

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODELOVÁNÍ PŘÍSTUPOVÝCH METOD DATOVÉ
KOMUNIKACE PO SILNOPROUDÝCH VEDENÍCH

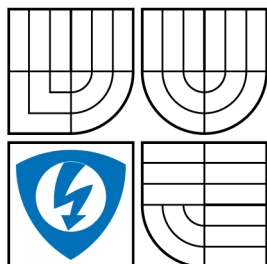
DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN KOUTNÝ



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODELOVÁNÍ PŘÍSTUPOVÝCH METOD DATOVÉ KOMUNIKACE PO SILNOPROUDÝCH VEDENÍCH MODELING OF MEDIUM ACCESS METHODS OF POWER LINE COMMUNICATION

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN KOUTNÝ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MIŠUREC, CSc.

BRNO 2011

ABSTRAKT

Práce se zaměřuje na analýzu, optimalizaci a modelování přístupové vrstvy datové komunikace po silnoproudých vedeních. V první části práce jsou stručně shrnuty základní informace o datovém přenosu po silnoproudých vedeních. V navazující části jsou kladeny cíle disertační práce. Jedním z hlavních cílů práce je zjednodušení současných modelů pro technologii a optimalizace distribuční funkce algoritmu HomePlug. Na stanovené dílčí cíle navazuje podrobná analýza technologie HomePlug, která je rozšířená v oblasti širokopásmového přenosu dat. V této části se práce zaměřuje na analýzu přístupové vrstvy. Pro potřebu analýzy byly realizovány diskrétní simulační modely v prostředí Matlab. Byl realizován aproximační diskrétní numerický model, který byl využit pro analýzu různých distribučních funkcí za účelem optimalizace backoff algoritmu. Výsledky ukazují, že nové optimalizace jsou vhodné spíše pro větší sítě. Poslední kapitolou je realizace nového přístupu k analytickému modelování přístupové vrstvy HomePlug. V této části byl realizován analytický model, který popisuje systém na základě pravděpodobnosti výskytu jednotlivých kolizních stavů. Tento model není tak přesný jako již publikované Markovovy modely, ale je jednodušší na implementaci a rychlejší na výsledky. V závěru jsou shrnuty výsledky těchto analýz.

KLÍČOVÁ SLOVA

CSMA/CA, HomePlug, PLC, přístupová vrstva, backoff algoritmus

ABSTRACT

The dissertation thesis is focused on analysis, modeling and optimization of the MAC layer of power line communication. In the first part of the paper, the thesis briefly summarizes a basic information of power line communication. In the next sections, the objectives of the dissertation are placed. A simplification of current models of HomePlug and a optimization of distribution function in back off procedure are one of the main goals of this work. A detailed analysis of HomePlug technology, which is widespread used in the broadband transmission, follows. The work is focused on analyzing of the MAC layer in this part. The discrete simulation models have been implemented in Matlab. The approximation discrete numerical model has been used for analysis of various distribution functions for HomePlug to optimize backoff algorithm. The new optimizations are suitable for large networks. The new approach of MAC modelling is introduced in last part of this work. The new model is not exact as Markov models but it is faster and easier for implementation. The analytical model describes a system using probabilistic functions.

KEYWORDS

CSMA/CA, HomePlug, PLC, medium access layer, backoff algorithm

KOUTNÝ, Martin *Modelování přístupových metod datové komunikace po silnoprůdých vedeních*: doktorská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. 121 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou doktorskou práci na téma „Modelování přístupových metod datové komunikace po silnoproudých vedeních“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího doktorské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené doktorské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této doktorské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

Děkuji vedoucímu disertační práce doc. Mišurcovi za metodickou a odbornou pomoc. Rád bych poděkoval také Mgr. Slavíčkovi za odborné konzultace a pomoc při sestavování modelů.

V neposlední řadě bych chtěl poděkoval rodičům a manželce Veronice za nemalou podporu, které se mi od ní dostává.

OBSAH

Úvod	13
1 Úvod do technologie PLC	15
1.1 Úzkopásmová PLC	16
1.2 Širokopásmová PLC	17
1.3 Definice PLC komunikace - Fyzická vrstva	17
1.3.1 Rušení v PLC	21
1.3.2 Modulace využívané v PLC technologii	22
1.4 Definice PLC komunikace - Přístupová vrstva	24
1.4.1 Mnohonásobný přístup k médiu	25
2 Stanovení požadavků služeb	28
2.1 Služby pro úzkopásmovou komunikaci	28
2.1.1 Požadavky úzkopásmovou komunikace	28
2.2 Služby pro širokopásmovou komunikaci	29
2.2.1 Požadavky širokopásmové komunikace	29
3 Cíle disertace	30
4 Přehled současného stavu - přístupová vrstva	32
4.1 Protokoly přístupové vrstvy	32
4.1.1 Protokoly s pevně daným přístupem	32
4.1.2 Dynamické protokoly	32
4.1.3 Vývoj v oblasti přístupových protokolů pro technologii PLC	33
4.2 Přístupová metoda CSMA	38
4.3 Backoff algoritmy - distribuční koordinační funkce	39
4.3.1 Uniformní náhodné rozdělení	40
4.3.2 Normální, Gaussovo, rozdělení	41
4.3.3 Exponenciální náhodné rozdělení	41
4.3.4 Weibullovo náhodné rozdělení	42
4.3.5 Vnitřní zaokrouhlovací funkce	43
5 Analýza systému HomePlug 1.0	47
5.1 Princip odesílání dat v technologii PLC	47
5.2 Rámec fyzické vrstvy HomePlug	48
5.2.1 Fixní složky rámce fyzické vrstvy	48
5.2.2 Variabilní složky rámce fyzické vrstvy.	49
5.3 Rámce MAC vrstvy HomePlug	50

5.3.1	Dlouhý rámec	50
5.3.2	Krátký rámec	53
5.4	Back-off algoritmus (BF)	53
5.4.1	Proměnné vstupující do BF algoritmu	53
5.5	Analýza a simulace CSMA/CA algoritmu	55
5.5.1	Účinnost algoritmu CSMA/CA technologie IEEE 802.11b . . .	56
5.5.2	Účinnost algoritmu CSMA/CA technologie Homeplug	57
5.5.3	Účinnost CSMA/CA	59
5.6	Analýza velikosti okna CSMA/CA algoritmu	60
5.6.1	Analýza velikosti okna algoritmu CSMA/CA technologie IEEE 802.11b	61
5.6.2	Analýza velikosti okna algoritmu CSMA/CA technologie Ho- mePlug	63
5.6.3	Porovnání velikosti okna CSMA/CA u technologie IEEE 802.11b a HomePlug	65
6	Optimalizace distribuční funkce	67
6.1	Úprava vnitřních funkcí backoff algoritmu	67
6.1.1	Optimalizace generátoru náhodných hodnot	67
6.2	Výsledky optimalizovaných metod	68
6.2.1	Propustnost algoritmu	71
6.2.2	Průměrný počet kolizí	72
6.2.3	Průměrná velikost doby čekání	72
6.3	Zhodnocení dosažených výsledků	73
7	Modelování přístupové vrstvy	74
7.1	Simulační model	74
7.2	Analytický model	74
7.2.1	Dvoudimenzionální model HomePlug	75
7.2.2	Třídimenzionální model HomePlug	77
7.3	Aproximační model technologie HomePlug	78
7.3.1	Odvození pravděpodobnosti kolize	79
7.3.2	Stanovení aproximačního modelu	80
7.4	Shrnutí modelování přístupové vrstvy	85
	Závěr	87
	Literatura	89
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	99

Seznam příloh	101
A Analýza propustnosti algoritmu HomePlug	103
A.1 Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - závislost parametrů na zatížení sítě	103
A.2 Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě	104
A.2.1 Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Distribuční rozdělení Beta	104
A.2.2 Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Exponenciální distribuční rozdělení	105
A.2.3 Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Weibullovo distribuční rozdělení . . .	106
B Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug	107
B.1 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - závislost parametrů na zatížení sítě	107
B.2 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě	108
B.2.1 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Distribuční rozdělení Beta	108
B.2.2 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Exponenciální distribuční rozdělení	109
B.2.3 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Weibullovo distribuční rozdělení . .	110
C Analýza okna algoritmu HomePlug	111
C.1 Analýza okna algoritmu HomePlug - závislost parametrů na zatížení sítě	111
C.2 Analýza velikosti okna algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě	112
C.2.1 Analýza velikosti okna algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Distribuční rozdělení Beta	112
C.2.2 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Exponenciální distribuční rozdělení	113

D	Odvození pravděpodobnostních funkcí vznikajících <i>ntic</i> v systému	114
D.1	Dva uzly v systému $n=2$	114
D.2	Tři uzly v systému $n=3$	114
D.3	Čtyři uzly v systému $n=4$	114
D.4	Pět uzlů v systému $n=5$	115
E	Průběžné výsledky výskytu <i>n-tic</i>	117

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Měření širokopásmové technologie v domácím prostředí.	18
1.2	Měření širokopásmové technologie v průmyslovém prostředí.	18
1.3	Elementární úsek vedení.	19
1.4	Distribuce signálu přes silnoproudé vedení.	20
1.5	Modelování silnoproudého vedení vícecestným šířením [12].	20
1.6	Rušení PLC kanálu.	21
1.7	Výběr modulací používaných v PLC.	23
1.8	Struktura přístupové vrstvy PLC [57].	24
1.9	Základní rozdělení metod přístupu ke společnému médium [50].	25
4.1	Časový diagram vývoje přístupových protokolů pro technologii PLC.	33
4.2	Hustota rozložení uniformní funkce.	40
4.3	Hustota funkce normálního rozložení.	41
4.4	Hustota funkce exponenciálního rozložení.	42
4.5	Hustota funkce Weibullova rozložení.	43
4.6	Vlastnosti zaokrouhlovacích funkcí na různé druhy distribučního rozložení	45
5.1	Zapouzdřování datových jednotek do vrstev HomePlug.	47
5.2	Definice rámců fyzické vrstvy v HomePlug [27].	48
5.3	Definice dlouhého rámce v HomePlug.	51
5.4	Definice datové složky dlouhého rámce v HomePlug.	52
5.5	Stanovení časových parametrů technologie IEEE 802.11b	56
5.6	Stanovení časových parametrů technologie HomePlug	58
5.7	Účinnost MAC algoritmu v HomePlug a IEEE 802.11b.	60
5.8	Průměrný počet kolizních stavů v síti v závislosti na počtu uzlů.	60
5.9	Backoff procedura v IEEE 802.11b.	61
5.10	Průměrná velikost okna backoff algoritmu technologie IEEE 802.11b	62
5.11	Průměrná velikost BC parametru backoff algoritmu technologie IEEE 802.11b	62
5.12	Backoff procedura v HomePlug.	63
5.13	Průměrná velikost okna backoff algoritmu technologie HomePlug	64
5.14	Průměrná velikost BC parametru backoff algoritmu technologie HomePlug	64
5.15	Porovnání velikosti okna algoritmu HomePlug a IEEE 802.11b	65
6.1	Rovnoměrná distribuce BC parametru.	68
6.2	Weibullova distribuce s parametrem B=2.	69
6.3	Průběh testovaných exponenciálních distribucí.	70
6.4	Průběh testovaných beta distribucí.	70

6.5	Optimalizace propustnosti algoritmu v HomePlug.	71
6.6	Optimalizace kolizí algoritmu v HomePlug.	72
6.7	Optimalizace průměrné doby čekání algoritmu v HomePlug.	73
7.1	Dvoudimenzionální Markovův model technologie HomePlug [37].	76
7.2	Aproximační model technologie HomePlug.	78
7.3	Porovnání jednotlivých modelových přístupů.	81
7.4	Pravděpodobnost výskytu kolizních ntic technologie HomePlug pro prioritní režim CA1.	83
7.5	Pravděpodobnost výskytu kolizních ntic technologie HomePlug pro prioritní režim CA2.	83
7.6	Výsledky analytického modelu pro prioritní režim CA1.	84
7.7	Výsledky analytického modelu pro prioritní režim CA2.	85
A.1	Analýza propustnosti algoritmu HomePlug	103
A.2	Distribuce beta - nezávislost generování okna na zatížení sítě, para- metr $k=\langle 1, 26, 51, 76 \rangle$	104
A.3	Exponenciální rozdělení - nezávislost generování okna na zatížení sítě	105
A.4	Weibullovo rozdělení - nezávislost generování okna na zatížení sítě . .	106
B.1	Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug	107
B.2	Distribuce beta - nezávislost generování okna na zatížení sítě, para- metr $k=\langle 1, 26, 51, 76 \rangle$	108
B.3	Exponenciální distribuce - nezávislost generování okna na zatížení sítě	109
B.4	Weibullova beta - nezávislost generování okna na zatížení sítě	110
C.1	Analýza velikosti okna algoritmu	111
C.2	Distribuce beta - nezávislost generování okna na zatížení sítě, para- metr $k=\langle 1, 26, 51, 76 \rangle$	112
C.3	Exponenciální distribuce - nezávislost generování okna na zatížení sítě	113
E.1	Výpočet volného pásma pro jednotlivý počet uzlů v síti	117
E.2	Výpočet volného pásma pro jednotlivý počet uzlů v síti	118
E.3	Výpočet volného pásma pro jednotlivý počet uzlů v síti	119

SEZNAM TABULEK

1.1	Rozdělení komunikačních pásem z hlediska norem.	15
4.1	Porovnání PLC technologií z hlediska přístupového protokolu a použitých modulací.	37
4.2	Porovnání komerčních PLC technologií z hlediska přístupového protokolu a použitých modulací.	38
5.1	Časová náročnost rámců fyzické vrstvy.	48
5.2	The backoff procedure values of HomePlug system.	54
5.3	Časové parametry technologie IEEE 802.11b pro analýzu backoff algoritmu.	57
5.4	Časové parametry technologie HomePlug pro numerickou analýzu backoff algoritmu.	58

ÚVOD

Komunikační datové sítě se staly fenoménem dnešní doby. Přítomnost datových sítí v současné době je téměř nezbytností. Síťová infrastruktura a telekomunikační sítě jsou jedny z nejrozšířenějších přístupových sítí do dalších datových spojů. Náklady na výstavbu nových sítí přesahují více než 50% nákladů na celkovou elektrifikaci při výstavbě nových budov. Situace je o to horší, má-li dojít k datovému zasíťování budov stávajících.

Současně s tímto trendem se stále více společnost zaměřuje na automatizaci, automatické měření a snižování spotřeby energií. S trendem snižování spotřeby energií jsou v dnešní době spojeny systémy např. AMR, které umožňují automatický odečet dat z elektrických zařízení. Měřené hodnoty těchto systému jsou přenášeny pomocí datových sítí do koncentrátorů. Mnohdy se jedná o mobilní technologii GPRS [5, 8] nebo Ethernet.

V budoucnu budou pravděpodobně tato data vyhodnocovat a zpracovávat inteligentní sítě SmartGrid [48]. Na základě těchto dat pak bude nejen elektrická energie směřována do míst, kde bude aktuálně zapotřebí. Predikce dodávky elektrické energie nebude výjimkou, ale nutností. S touto predikcí bude spojeno automatické oznamování aktuální spotřeby energie, o kterou si elektrické přístroje požádají prostřednictvím přístupových sítí automaticky ve vlastní režii.

Ne všechny systémy a budovy jsou na tuto budoucnost připraveny. Především starší zástavby neobsahují technické prostředky pro realizaci takové vize. Na úkor toho jsou nově realizovány moderní síťové infrastruktury ve starších budovách. Instalace moderních sítí ve starších zástavbách přináší možnosti využití moderního telekomunikačního kanálu pro zajištění všech služeb (datové, hlasové, video služby). S tím samozřejmě souvisí zvýšené náklady na realizaci. Realizace takové sítě v budově obsahující několik stovek bodů může být nákladná.

Jednou z možností, jakým způsobem řešit podobné situace, je využití stávající elektrické sítě k zajištění datových služeb. Technologie přenosu dat po silnoprůdých vedeních, Power Line Communication (PLC), není novinkou. V roce 1950 byla navržena jedna z prvních PLC technologií, známá jako HDO (hromadné dálkové ovládání) a poté nasazen na rozvodnou síť středního a nízkého napětí. Nosná frekvence byla mezi 100 Hz a 1 kHz [83]. Tím bylo umožněno např. dálkové zapnutí a vypnutí veřejného osvětlení. Již v roce 1897 je zapsán první patent pro dálkové ovládání přes elektrické vedení [36]. Dnes jsou PLC technologie využitelné nejen v automatizaci. Při použití širokopásmové modulace, je možné tento způsob využít např. i pro propojení několika LAN sítí, k přístupu na Internet či pro některé služby vyžadující zajištění kvality služeb, QoS (Quality of Services), jako např. VoIP [13].

Hlavní výhodou přenosu po silnoprůdém vedení je využití stávající rozvodné

sítě středního (SN) nebo nízkého napětí (NN). Proto není mnohdy nutné pokládat další kabeláž. Ovšem primární využití těchto rozvodů je přenos elektrické energie s frekvencí 50 Hz.

Tato skutečnost přináší řadu problémů jako je např. silné rušení, rozdílné impedance vedení, potřebu dodržení elektromagnetické kompatibility apod. Princip přenosu spočívá v použití některé z úzkopásmových či širokopásmových modulací, kdy jsou data určená k přenosu namodulována na signál stávající, tedy na nosnou frekvenci 50 Hz. Takto přenesený signál je na straně příjemce pomocí vazebního obvodu oddělen od nosné frekvence, čímž je v ideálním případě (bez rušení) obdržen zpět původní datový signál.

Z těchto důvodů je zapotřebí na technologii PLC stále pohlížet jako na technologii, kterou je potřeba vyvíjet. Proto se řada výzkumných týmů snaží tuto technologii modelovat a integrovat do simulačních aplikací za účelem ověření nových modulačních technik a přístupových algoritmů. Modelování technologie PLC můžeme v tomto směru rozdělit na dvě základní odvětví. První z odvětví je modelování fyzické vrstvy. Tyto modely se snaží co nejpřesněji popsat chování fyzického kanálu. Druhá oblast je modelování přístupové vrstvy. Tato oblast se snaží modelovat a simulovat nové trendy v přístupové vrstvě. Technologie PLC využívá pro přenos dat jeden společný kanál. Proto je zapotřebí se soustředit i na algoritmy přístupu na společně využívané médium.

Tato práce je zaměřena na modelování a optimalizaci algoritmů přístupové vrstvy, které jsou součástí standardu PLC. V práci je shrnuta technologie PLC. Je popsána fyzická a přístupová vrstva. Další kapitolou je shrnutí základních cílů, čeho a proč chce tato práce dosáhnout. Následuje podrobný rozbor a analýza přístupových technik, možností modelování a simulace nejrozšířenějšího komerčního standardu HomePlug 1.0 (dále jen HomePlug) [52]. Dále práce představuje vlastní optimalizaci a porovnání tohoto standardu. Dokazuje, že v některých ohledech si zaslouží tento standard přepracování. V roce 2009, kdy byl představen HomePlug AV [53], byl částečně původní standard upraven v oblasti fyzické vrstvy. Detailní popis HomePlug AV však není volně přístupný. Analýza a porovnání dalších algoritmů budou předmětem další vědecké činnosti.

1 ÚVOD DO TECHNOLOGIE PLC

Komunikace po silnoproudých vedeních není v dnešním světě novinkou. Její historie je datována do počátků 20. století. Od té doby prošel druh této komunikace řadou změn. Nejvýznamnější změnou, která se udála, je standardizace úzkopásmové komunikace. Je definována evropským standardem CENELEC EN 50065 [28]. Norma je rozdělována na tři základní dokumenty.

- EN50065-1 definuje obecné požadavky týkající se frekvenčních pásem a elektromagnetického rušení Tab. 1.1.
- EN50065-4-2 týká se nízkonapěťových oddělovacích filtrů a bezpečnostních požadavků.
- EN50065-7 zabývá se impedancí připojených zařízení.

Tab. 1.1: Rozdělení komunikačních pásem z hlediska norem.

Pásmo	Šířka pásma [kHz]	Max. amplituda signálu [V]	dodatek
-	3 - 9	-	pro dodavatele. el. energie
A	9 - 95	1 - 5	po souhlasu dodavatelů i pro odběratele
B	95 - 125	1,2	pro odběratele, nevyžaduje protokol přístupu dle normy
C	125 - 140	1,2	pro odběratele, vyžaduje protokol přístupu dle normy
D	140 - 148,5	1,2	pro odběratele, vyžaduje protokol přístupu dle normy

CENELEC definuje přenosové rychlosti v oblastech desítek kilobitů až tisíců kilobitů za sekundu. Je zřejmé, že takové přenosové rychlosti nemohou být adekvátním konkurentem moderních přístupových sítí. Existuje však možnost rychlého přenosu dat po silnoproudých vedeních. Jedná se o technologii širokopásmových datových přenosů po silnoproudém vedení. Oblast přenosu dat je z technologických důvodů posunuta do řádů MHz. Využívá přenosové pásmo v oblasti 1,6 až 30 MHz. V současné době existuje více než 50 různých výrobců, kteří se snaží standardizovat širokopásmovou technologii PLC. Lze říci, že nejdále v této standardizaci je sdružení HomePlug, jejichž zařízení slouží pro vysokorychlostní přenos dat po elektrické síti. Všechna tato řešení jsou určena pro vnitřní využití.

Jedna z možností, která se doposud využívá pro vnější sítě ve velmi vysokém napětí (VVN) a vysokém napětí (VN) hromadné dálkové ovládání (HDO). HDO působí na nízkých kmitočtech v řádech stovek Hz až jednotek kHz a je určeno pro šíření ve VVN a VN sítích. Jedná se tedy spíše o úzkopásmovou komunikaci. Tímto způsobem je v současné době zajišťováno např. ovládání veřejného osvětlení nebo spínání jiných tarifů elektrické energie.

Širokopásmová technologie mnohdy do vyšších vrstev vkládá klasický TCP/IP stack, čímž se stává kompatibilní se stávajícími síťovými architekturami. Technologie PLC je zapouzdřena právě v přístupové a fyzické vrstvě zmiňovaného síťového modelu. Při porovnání s klasickým Ethernetem 10-Base-T, který rovněž specifikuje poslední dvě vrstvy modelu, je možné tuto technologii přirovnat právě jemu. Z pohledu přístupu je však tato technologie více podobná bezdrátovým technologiím.

1.1 Úzkopásmová PLC

Úzkopásmový datový přenos dat je definován evropskými normami CENELEC [29], viz. Tab 1.1. Pásmo 3 - 9 kHz je vyhrazeno pro potřeby dodavatele elektrické energie. Pásmo A 9 - 95 kHz je určeno prioritně pro dodavatele elektrické energie, ale po jejich souhlasu může být využito i na straně odběratele. Pásmo B, C a D jsou určena pro odběratele elektrické energie a liší se pouze v protokolu přístupu, který je vyžadován pouze u kategorie C. Z technologických důvodů je maximální vzdálenost mezi dvěma PLC modemy 1 - 2 km a jejich další prodloužení musí být zajištěno opakovači.

První úzkopásmové modemy realizovaly amplitudové klíčování (ASK). Tato technika je vidět i u současných modemů, ale upouští se od ní. ASK je postupně nahrazována binárně fázovým klíčováním (BPSK). Tento typ modulace v porovnání s ASK nabízí robustnější nasazení ve více distribuovaných systémech. Mnoho současně realizovaných úzkopásmových modemů je v nynější době realizováno s frekvenčním klíčováním (FSK). Další z modulací, která je nasazována v úzkopásmových modemech, je ortogonální modulace (OFDM), která nabízí vyšší odolnost proti rušení.

Úzkopásmové modemy jsou realizovány především pro řízení a automatizaci systémů a pro měření různorodých veličin. Tyto systémy umožňují jen jednoduché zasílání zpráv, které je vhodné zejména pro automatizaci budov při řízení klimatických jednotek, vytápění, osvětlení či bezpečnostní aplikace [3, 4, 7]. Úzkopásmová modulace je tedy využita především v inteligentních domech (smart home [98]).

1.2 Širokopásmová PLC

Širokopásmová datová komunikace po silnoprůdých vedeních nabízí rychlosti v řádech mega bitu. Oproti úzkopásmově zaměřené datové komunikaci je tento typ komunikace vhodný především pro zajištění širšího spektra telekomunikačních služeb. Z tohoto hlediska se jedná zejména o datové, hlasové popř. nově video služby [2].

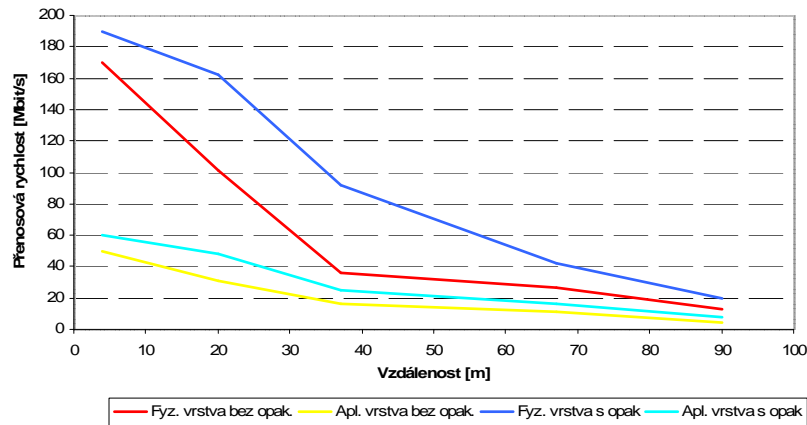
Pro zajištění těchto služeb je využito vyššího frekvenčního pásma (30 MHz). Díky tomu je možné dosáhnout daleko vyšších přenosových rychlostí, avšak na úkor vzdálenosti. Ta je u této technologie v řádech stovek metrů, ačkoli některé standardy uvádějí daleko více. Je třeba dodat, že u této technologie je tato vzdálenost krácena charakterem silnoprůdého vedení, na kterém je provozována. Tyto podmínky mohou být na různých pracovištích odlišné. Nevýhoda nasazení této technologie je, že není standardizována a tudíž podporovaná evropským standardizačním institutem. Právě z tohoto důvodu se vývoj v této oblasti ještě očekává. Z tohoto důvodu je v této oblasti rozvinuto více standardizačních směrů. Jedna z rozšířených technologií je právě HomePlug. Tato technologie je vhodná zejména pro oblast smart home (inteligentní domy). Tyto inteligentní systémy a sítě smart grid jsou prioritní osou Evropské unie [43]. Z ustanovení vyplývá, že se Evropská unie do roku 2020 zavázala ke třem základním dílčím cílům k redukci energie. Nepřímo to tak souvisí se širším nasazením těchto sítí. Právě z tohoto důvodu je výzkum a vývoj v této oblasti značně významný. Technologie PLC je jedna z možných komunikačních způsobů.

Z praktických měření však vyplývá, že jak širokopásmová i úzkopásmová technologie má stále problémy s dosažením komunikační vzdáleností dle teoretických předpokladů [72]. Obrázky 1.1 a 1.2 ukazují výsledky z měření standardu HomePlug AV, kde teoretická přenosová rychlost výrobcem je udávána 200 Mbit/s. Tento problém je mnohdy spojován s technologickým provedením silnoprůdové sítě, stavem této sítě a rušením, které se v této síti objevují. Všechny tyto aspekty komunikační signál značně ovlivňují. Robustní modulační techniky, které na úkor spolehlivosti snižují přenosovou rychlost, se snaží tento problém do jisté míry minimalizovat.

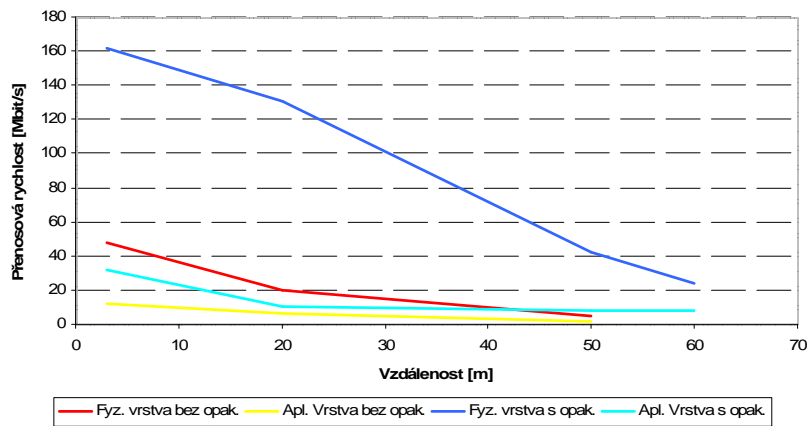
Výsledky mimo jiné potvrzují, že právě v zarušených prostředí (v tomto případě aktivní provoz lisovny) přenosová rychlost značně klesá.

1.3 Definice PLC komunikace - Fyzická vrstva

Pro definici datové komunikace po silnoprůdém vedení je nutné bližší seznámení se samotným přenosovým médiem. Síť pro distribuci elektrické energie lze rozdělit na části podle napěťových úrovní. V České republice jsou dnes využívány přenosové trojfázové soustavy s následujícím normalizovaným napětím.



Obr. 1.1: Měření širokopásmové technologie v domácím prostředí.

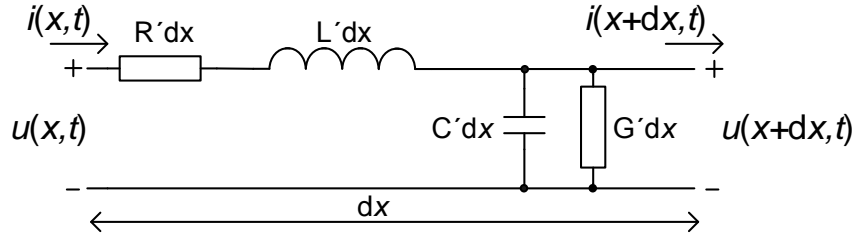


Obr. 1.2: Měření širokopásmové technologie v průmyslovém prostředí.

- Velmi vysoké napětí (VVN): 110 kV, 220 kV, 400 kV a 1000 kV - používá se k propojení velkých oblastí, případně pro připojení velkých odběratelů. Toto vedení umožňuje přepravu energie na velké vzdálenosti. Jedná se především o nadzemní kabeláže.
- Vysoké napětí (VN, někdy také NN): 6 kV, 10 kV, 22 kV a 35 kV - používá se pro zásobování menších oblastí, měst, případně velkých průmyslových podniků. Vzdálenosti jsou podstatně menší než u VVN. Pro VN sítě se používají nadzemní i podzemní kabelová vedení.
- Nízké napětí (NN): 230 V, 400 V a 500 V - používá se pro dodávku energie koncovým uživatelům. Délka těchto sítí bývá několik set metrů. Ve městech se jedná převážně o podzemní vedení.

Silnoproudá vedení jsou pro účely modelování mnohdy definována pomocí časově variantně závislých telegrafních rovnic. Tyto rovnice jsou určeny pro elementární úsek

vedení. Elementární úsek dx dvojvodičového vedení se dá popsat pomocí náhradního modelu složeného z pasivních prvků, zobrazeného na Obr. 1.3 [10, 17].



Obr. 1.3: Elementární úsek vedení.

Elementární parametry úseku vedení délky dx jsou pak $R'x$, $L'x$, $C'x$, $G'x$. Na tento model je možné aplikovat Kirchhoffovy zákony. Po úpravě jsou obdrženy výsledné telegrafní rovnice:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + R'i + L'\frac{\partial i}{\partial t} = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} + G'u + C'\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (1.2)$$

Vzájemným řešením rovnic a úpravami je možné získat parametry popisující silnoprůdové vedení, měrný činitel přenosu γ a charakteristickou impedanci Z_C :

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (1.3)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (1.4)$$

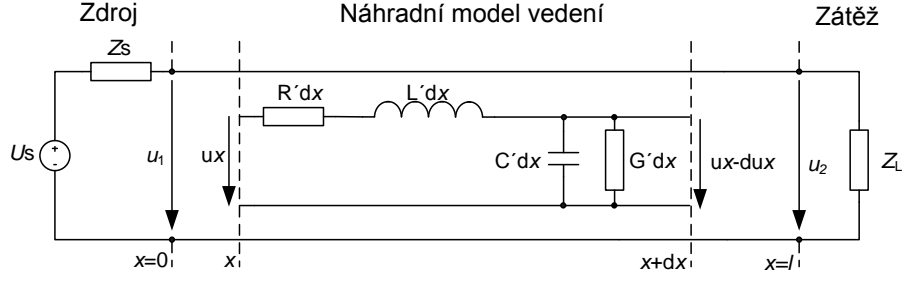
kde α je měrný útlum (m^{-1}) a β je měrný fázový posuv ($rad \cdot m^{-1}$).

Silnoprůdové vedení může být považováno za vícecestný kanál, jelikož vícecestné šíření je způsobeno impedančně nepřizpůsobenými odbočkami vedení. Na Obr. 1.4 je zobrazena distribuce signálu přes náhradní model silnoprůdového vedení [23, 79].

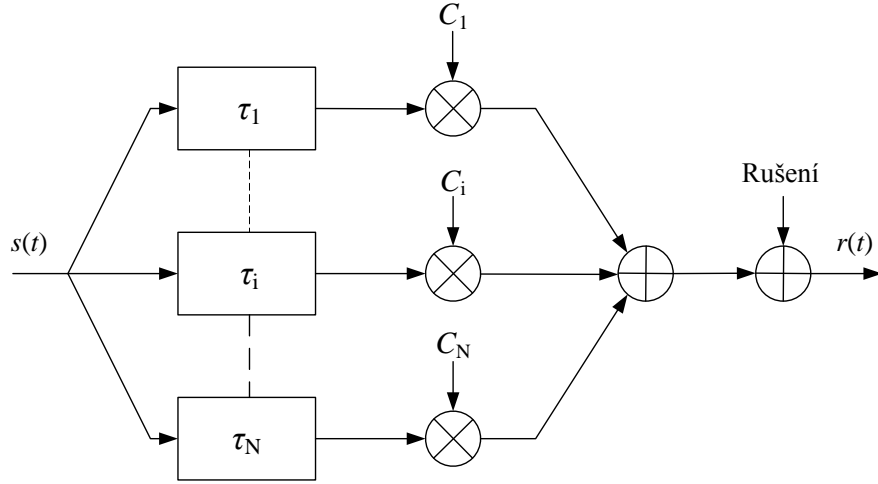
Pokud je uvažováno vedení, které je ekvivalentní vlně šířící se od zdroje k zátěži, je možné přenosovou funkci vedení délky l určit výrazem:

$$H(f) = \frac{U(x=l)}{U(x=0)} = e^{-\gamma(f)l} = e^{-\alpha(f)l} e^{-j\beta(f)l} \quad (1.5)$$

Silnoprůdové vedení vykazuje značné nehomogenity, které se projevují odrazy, vícecestným šířením a tedy vícenásobným příjmem signálu. Na Obr. 1.5 je zobrazen obvyklý model reprezentující vícecestné silnoprůdové vedení. Přenášený signál se šíří k přijímači přes N různých cest.



Obr. 1.4: Distribuce signálu přes silnoproudé vedení.



Obr. 1.5: Modelování silnoproudého vedení vícecestným šířením [12].

Každá cesta i je definována určitým zpožděním τ_i a faktorem útlumu C_i . Poté lze silnoproudé vedení popsat impulzní odezvou $h(t)$:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot \delta(t - \tau_i) \iff H(f) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1.6)$$

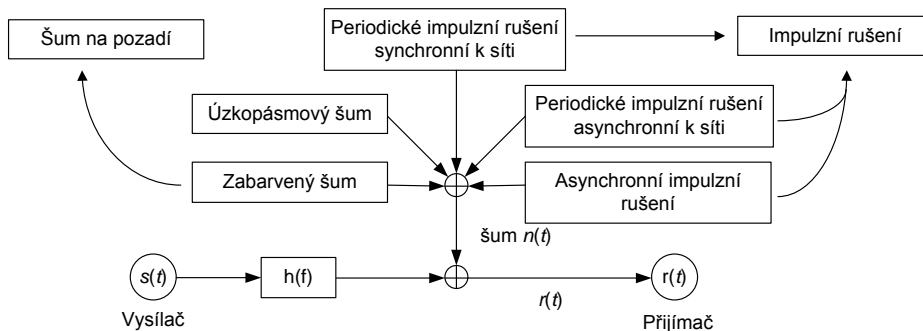
Výslednou přenosovou funkci lze modelovat jako prostředí s vícecestným šířením signálu:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot A(f, l_i) \cdot e^{-j2\pi f \tau_i}, \quad (1.7)$$

kde g_i je váha cesty reprezentující odrazy a faktory přenosu podél cesty. Dosazením útlumu vedení $A(f, l_i)$ je obdržena výsledná přenosová funkce modelu silnoproudého vedení. Útlum vedení je popsán např. v [57]. Přenosová funkce vedení zahrnuje charakteristické parametry vedení, útlum, proměnnou impedance a vícecestné šíření signálu [57, 23].

1.3.1 Rušení v PLC

Na Obr. 1.6 je znázorněn zjednodušený model PLC komunikačního kanálu. Parametry rušení, kromě šumu, jsou znázorněny jako časově proměnný lineární filtr charakterizovaný frekvenční odezvou. Šum je znázorněn jako aditivní interferující náhodný proces. V následujících podkapitolách jsou zmíněna rušení, s kterými se musí PLC vrstva rovněž potýkat [41].



Obr. 1.6: Rušení PLC kanálu.

Šum na pozadí

Tento druh rušení je prakticky vždy zastoupen v energetické síti. Je složen z velkého počtu různých zdrojů rušení o nižší intenzitě a jeho parametry jsou proměnné v časové oblasti. Lze jej popsat výkonovou spektrální hustotou PSD, která s rostoucím kmitočtem klesá. Hodnoty této výkonové spektrální hustoty pro oblast šumu na pozadí dosahují hodnot řádově desítek Hz až 20 kHz.

$$A(f) = A_{\infty} + A_0 \cdot e^{\frac{-f}{f_0}} \quad (1.8)$$

kde A_{∞} udává výkonovou hustotu pro $f \rightarrow \infty$, A_0 je rozdíl mezi A_{∞} a A_0 .

Úzkopásmové rušení

Tento druh rušení má tvar úzkých špiček s vysokou hodnotou PSD zasahující do energetické sítě. Úzkopásmové rušení je vytvářeno především spínanými procesy v sítích měničů frekvencí, zářivkami, televizními obrazovkami nebo CTR monitory. Rušení těmito zdroji je zastoupeno především v oblasti okolo 150 kHz. Na vyšších kmitočtech se s úzkopásmovým rušením lze rovněž setkat. V těchto oblastech je způsobováno rozhlasovými stanicemi ve středovlnném a krátkovlnném pásmu. Úzkopásmové rušení lze popsat jako

$$n(f) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot \sin(2\pi f_i t + \varphi_i), \quad (1.9)$$

kde N počet vln lišících se frekvencí f_i , amplitudou $A_i(t)$ a fází φ_i . Fáze φ_i je určena náhodně z intervalu $[0; 2\pi]$.

Impulzní rušení

Typickou příčinou vzniku impulzního rušení jsou spínací přechody při kontaktním spínání elektrických obvodů a soustav. To mohou být např. spínané zdroje, tyristorové regulátory nebo elektromotory. Jedná se o rušivé signály impulzního charakteru s velkým poměrem velikosti impulzů. Na užitečný signál jsou tyto impulzy namodulovány jako kladné nebo záporné špičky s délkou trvání jednotek až desítek μs . Jsou rozlišovány dva druhy tohoto rušení.

- Synchronní rušení, které je nejčastěji způsobováno napěťovými konvertory a stmívači.
- Asynchronní rušení, které je způsobeno již zmiňovanými spínanými prvky v energetické síti.

1.3.2 Modulace využívané v PLC technologii

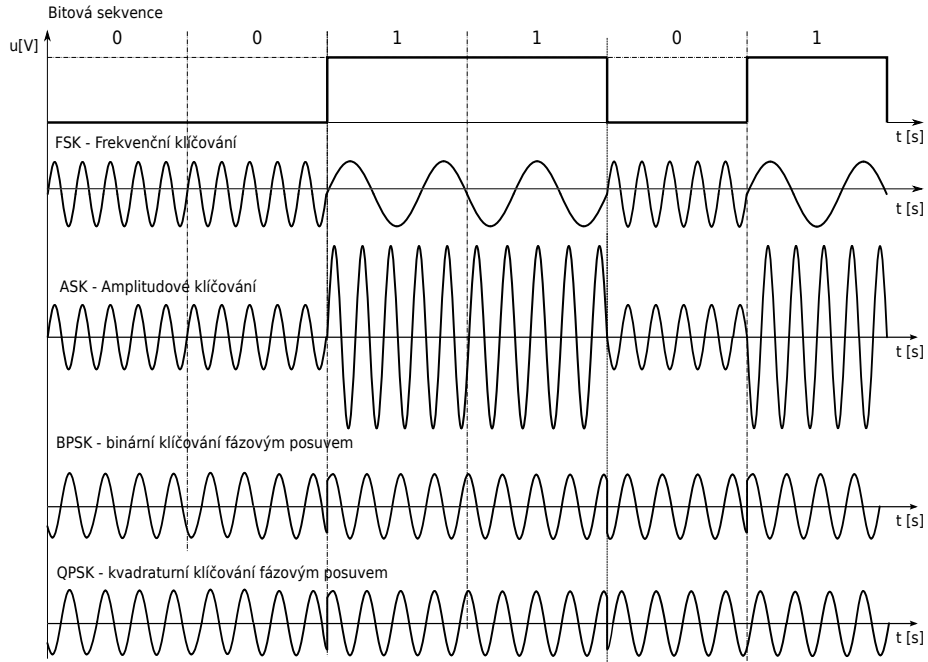
Podle typu datové komunikace je volena konkrétní digitální modulace. V technologii PLC jsou využívány úzkopásmové i širokopásmové modulace. Grafické znázornění principu některých z nich je uvedeno na Obr. 1.7.

Amplitudové klíčování

ASK je založeno na přiřazení rozdílné amplitudy pro logickou 1 a logickou 0. Vývoj v oblasti datové komunikace byl začat právě využitím této modulace. Dlouhou dobu byla tato modulace využívána v jenom z nejstarších zástupců PLC modemů TDA5051 [82].

Fázové klíčování

Jedná se o dvoustavovou modulaci. Jedna frekvence je přiřazena logické 1 a jiná logické 0. Zároveň je zařízeno, aby nedocházelo ke změně fáze v daném přenosu. Tato technika je jednoduchá a odolnější proti rušení než modulace ASK. Z těchto důvodů je velmi rozšířená (využívá ji např. PLC modem ST7538 [90]).



Obr. 1.7: Výběr modulací používaných v PLC.

Binární fázové klíčování

Při modulaci BPSK dochází ke změně fáze nosného signálu. Jsou možné dva stavy fázového posuvu, 0 a π . Obdobou je DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying), kdy nedochází k nastavení fáze na určitou hodnotu jako v předešlém případě ale fáze je posunuta oproti poslední hodnotě o π . Kanálové symboly pro BPSK jsou z intervalu

$$d_n \in \{-1, 1\}. \quad (1.10)$$

Tím je zamezeno chybám při nechtěné změně fáze vzniklé přenosem přes komunikační kanál. Tento typ modulace je využit např. v chipecích SM2101 [88].

Kvadraturní fázové klíčování

QPSK je obdobou BPSK. Rozdíl je v počtu možných stavů. Jedná se o 4 stavovou modulaci, kdy každý stav zastupuje určitou kombinaci dvou bitů modulovaného signálu. Na stejném principu existují i vícecestavové modulace jako 8PSK i rozdílové modulace DBPSK. Tento typ modulace je využit např. v ST7580 [91].

$$d_n \in \left\{ e^{j\frac{\pi}{4}} e^{j\frac{\pi}{2}i} \right\}_{i=0}^{M_d-1} = \left\{ \frac{1+j}{\sqrt{2}}, \frac{-1+j}{\sqrt{2}}, \frac{-1-j}{\sqrt{2}}, \frac{1-j}{\sqrt{2}} \right\} \quad (1.11)$$

Ortogonalní multiplex s frekvenčním dělením

OFDM je používána především v širokopásmových PLC modemech [16]. Tato modulace je relativně náročná, ale velmi odolná proti rušení. Této odolnosti je dosaženo rozdělením přiděleného pásma na dílčí subpásma, která jsou od sebe vzdálena tak, aby nedocházelo k jejich překryvu. V každém dílčím pásmu je použita některá z předchozích modulací (např. QPSK). Tento typ modulace je využit např. u modemu ST7590 [92].

Další typy modulací jsou prozatím zkoumány. Především se jedná o modulaci FMT a její klony [15].

1.4 Definice PLC komunikace - Přístupová vrstva

Přístupové metody mají klíčovou roli při odesílání dat na společně sdílené médium. Metody zabezpečují svými algoritmy bezproblémové odesílání, resp. příjem dat. Korespondující funkce přístupové vrstvy mohou být rozděleny do následujících tří skupin [55]:

- mnohonásobný přístup,
- sdílení zdrojů,
- funkce řízení přenosu.

Mnohonásobný přístup je pro silnoproudou datovou komunikaci specifický. Zejména v této oblasti je funkce přístupové vrstvy důležitá. Umístění přístupové vrstvy ve vrstevném modelu zobrazuje Obr. 1.8. Topologie sítě je definována většinou topologií elektrické sítě a může obsahovat od desítek až po stovky uzlů v závislosti na použití komunikace.



Obr. 1.8: Struktura přístupové vrstvy PLC [57].

Pokud bude přihlíženo k faktu, že tento typ datové komunikace je vhodný jak pro řízení a automatizaci budov a zároveň vhodný pro zajištění standardních širokopásmových služeb, počet prvků v síti může odpovídat počtu uživatelů a jejich

periferií. V budoucnu se může jednat o tisíce uzlů v jedné zástavbě. S přihlédnutím k možným vlivům rušení a počtu těchto uzlů v síti je zřejmé, že právě v této oblasti musí být zajištěny robustní algoritmy pro zajištění přístupu k médiu. Předchozích verze PLC [49] využívaly token passing algoritmy. Při současném způsobu komunikace však není tato technologie vhodná. K zajištění mnohonásobného přístupu je proto soustředěn výzkum a vývoj v oblasti náhodného přístupu s minimalizací kolize.

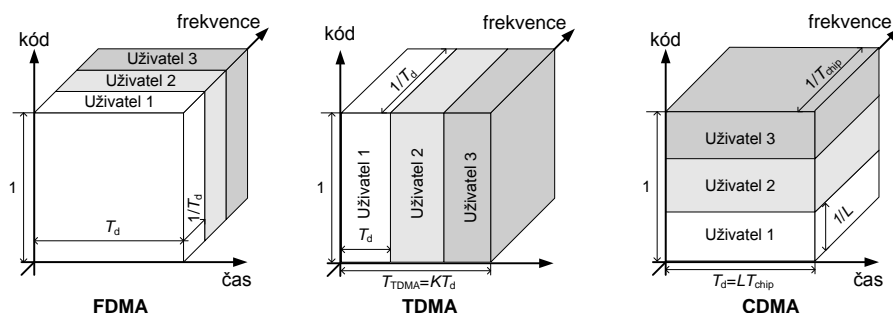
1.4.1 Mnohonásobný přístup k médiu

Pro zajištění mnohonásobného přístupu v telekomunikačních sítích jsou realizovány mechanismy, které fyzicky umožní oddělit komunikaci jednoho účastníka od druhého v jednom směru. Za tímto účelem jsou signály různých účastníků komunikace při odesílání přes sdílené médium navzájem ortogonální a lze je popsat rovnicí

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_i(t) x_j(t) dt = \begin{cases} 0 & \text{pro } i = j \\ 1 & \text{pro } i \neq j. \end{cases} \quad (1.12)$$

V praxi je samozřejmě nemožné zajistit ideální ortogonalitu mezi odlišnými signály. Pro zajištění mnohonásobného přístupu v PLC jsou běžně využívány tři standardní scénáře. Kombinací těchto scénářů vznikají hybridní přístupy. Jejich účelem je využití dobrých vlastností standardních přístupů a aplikovat je společně do nových scénářů. Mezi základní mnohonásobné přístupy k mediu patří:

- časově oddělený mnohonásobný přístup (TDMA),
- frekvenčně oddělený mnohonásobný přístup (FDMA),
- kódově oddělený mnohonásobný přístup (CDMA).



Obr. 1.9: Základní rozdělení metod přístupu ke společnému médiu [50].

Základní rozlišení těchto přístupů ukazuje Obr. 1.9. Při časově odděleném přístupu je všem uživatelům specifikován časový okamžik, v kterém je umožněno vysílat. Při frekvenčně odděleném přístupu je všem uživatelům specifikována konkrétní frekvence, na které je umožněno vysílat. Při kódově odděleném přístupu je to pak

kód s kterým konkrétní uživatelé vysílají.

TDMA

V časově oddělených systémech je časová osa vysílání rozdělena na několik definovaných úseků, tzv. timeslotů. Tyto timesloty zajišťují časově oddělený přístup jednotlivých účastníků komunikace. Každý slot je určen pro přenos jedné zprávy od jednoho účastníka. Mezi těmito časovými sloty je definovaný mezisymbolový časový slot, který zajišťuje interval, při kterém nejsou vysílána žádná data. TDMA mechanismus je obvykle využíván pro přenos datových jednotek. Velikost těchto datových zpráv mnohdy převyšuje kapacitu daného timeslotu. Z tohoto důvodu dochází k segmentaci zpráv, a proto musí být zajištěny algoritmy pro synchronizaci těchto zpráv. V případě, že se některý ze segmentů ztratí, musí být zajištěno automatické vyslání téhož segmentu k zajištění integrity celé zprávy. V těchto systémech je tento přístup zajištěn ARQ algoritmy.

Segmentace zpráv u TDMA

K zajištění implementace časového rozdělení pásma je mnohdy potřeba segmentace dat. K segmentaci dat dochází v případech, kdy časový slot z kapacitních důvodů nepřenese danou datovou jednotku. Díky rozdělení datových jednotek na menší jednotky, je zajištěna lepší správa datových prostředků v síti. V případě ztráty některého z časových slotů, resp. jednotky, není nutné přenášet celou datovou zprávu ještě jednou, ale postačuje její chybějící část.

Tímto způsobem je zajištěna i snazší realizace kvality služeb v síti, protože nedochází k neúčelnému přenosu části zpráv, které byly přeneseny bezchybně. Datová segmentace však s sebou přináší i větší režii v podobě počítání zpráv, umístování hlaviček zpráv atp., což v se v konečném důsledku projeví ve zvýšeném přenosu dat v podobě těchto informací. Optimální velikost segmentu může být zvolena na základě bitové chybovosti BER v použitém komunikačním systému [86, 73]. Pokud systém využívá algoritmy pro znovuzaslání ztraceného segmentu jako je např. ARQ algoritmus, optimální velikost segmentu může být vypočítána jako

$$S_{opt} = \frac{-h \ln(1-p) - \sqrt{-4h \ln(1-p) + h^2 \ln(1-p^2)}}{2 \ln(1-p)}, \quad (1.13)$$

kde p je kanálový BER a h je počet přeslechnutých bitů na jeden segment.

FDMA

Frekvenční oddělení vysílaných dat je další metoda víceuživatelského přístupu. Systém přidělí různé části kmitočtového spektra, které jsou k dispozici, různým uživatelům systému. Ortogonalita může být rovněž definována v kmitočtovém rozsahu

podobně jak Rov. 1.12 jako

$$\int_{-\infty}^{\infty} X_i(f) X_j(f) dt = \begin{cases} 0 & \text{pro } i = j \\ 1 & \text{pro } i \neq j. \end{cases} \quad (1.14)$$

Každý přenosový kanál využívá vlastní frekvenční pásmo v rozsahu daného frekvenčního spektra použitého přenosového média. Rychlost přenosu je pak závislá na přidělené šířce přenosového pásma. Výhodou tohoto přístupu je větší odolnost proti úzkopásmovým šumům a větší odolnost proti rušivým impulsům. Díky tomuto přístupu je možné z frekvenčního pásma vyřadit některé frekvence a tím omezit elektromagnetické rušení společných kanálů s jinými šikopásmovými technologiemi. Proto je možné do značné míry omezit vzájemné rušení na daných frekvencích [74].

Kapacita kanálu je limitována použitou šířkou pásma, resp., počtem reálných kanálů, které lze v systému vytvořit.

CDMA

Tato přístupová metoda poskytuje pro rozdělení síťových prostředků kódové rozdělení. Data z různých uživatelů se označují kódovým značením, které je použito pro identifikaci zdroje zprávy. Mohou tak být přenesena pomocí stejné frekvence, aniž by docházelo k interferenci mezi nimi. Provedení této metody je mnohdy realizováno pomocí metody rozprostřeného spektra. Informace, která má být odeslána, má šířku pásma B a dobu trvání T_s .

Informace je pomocí pseudokódu konvertována do signálu s obsazenou frekvencí W s $W \gg B$. Multiplikativní šířku pásma lze měřit pomocí spread-spectrum parametru, který je definován jako

$$G = \frac{W}{B} = W \cdot T_s \quad (1.15)$$

Mezi výhody tohoto způsobu patří odolnost proti rušení a bezpečnost přenosu. Jako příklady realizovaných řešení lze uvést $DS-CDMA$ a $FH-CDMA$ [69]. $DS-CDMA$ je založeno na přímém rozprostřeném spektru DSSS, kde každá uživatelská data jsou násobena specifickou binární sekvencí.

$FH-CDMA$ je založeno na "frekvenčním skákání" (frequency hopping) rozprostřeného spektra FHSS, kde každé vysílání je rozprostřeno přes různá kmitočtová pásma, která jsou v systému využita. Kapacita kanálu pro počet uživatelů $M > 1$ je definována jako

$$M = \frac{W/R}{E_b/N_0} \quad (1.16)$$

kde M je počet uživatelů v síti, E_b/N_0 je energie potřebná na přenesení 1 bitu informace vztahovaná ke spektrální výkonové hustotě šumu.

2 STANOVENÍ POŽADAVKŮ SLUŽEB

Pro výzkum přístupových metod pro powerline sítě je zapotřebí, aby byly shrnuty základní požadavky na powerline sítě. Tyto požadavky jsou pro každou technologii vysílání různé a liší se především v nárocích na datový přenos. Ucelením těchto informací bude proveden závěr, který bude sdružovat základní požadavky z obou kategorií vysílání a bude na něj brán zřetel v návrhu optimalizace přístupové metody.

2.1 Služby pro úzkopásmovou komunikaci

Úzkopásmová technologie je ve stanovení služeb před širokopásmovou technologií. Standardy, které byly zmiňovány v předchozích analýzách, jsou určeny především pro systémy AMR u kterých se předpokládá v budoucnu rozšiřování [45]. Jejich rozšiřování je podpořeno budoucím rozvojem inteligentních sítí smart grids. Tyto inteligentní sítě jsou již v dnešní době testovány na různých místech Evropy i světa. V Evropském měřítku je nejdále Německo, které v letech 2000 - 2005 razantněji podporovalo výzkum právě v oblasti PLC. Výsledkem této podpory je největší testovací oblast inteligentních sítí [44], která se především vyznačuje využíváním úzkopásmové technologie v poslední míli energetické sítě. Testovací oblast zahrnuje téměř 1000 měřicích uzlů.

2.1.1 Požadavky úzkopásmovou komunikace

Základní požadavky na úzkopásmovou komunikaci PLC byly definovány a shrnuty např. v [71, 11]. Mezi tyto požadavky je možné zahrnout:

- vzdálený odečet dat,
- vzdálená správa a řízení,
- monitoring systémů.

Jedná se tedy o komunikaci, pro kterou není zapotřebí větší šířka pásma. Ve většině případů se jedná o jednoduché a krátké zprávy. Tyto zprávy bývají zpravidla povelové nebo odpovědní. V povelových zprávách jsou zasílány příkazy centrálním uzlem koncovým uzlům sítě. Komunikace může být rozdělena na unicastovou, broadcastovou nebo multicastovou [6, 9]. Prvky obvykle na tuto zprávu reagují jednoduchou odpovědí nebo kontinuálním odesláním dat. Ve většině případů se jedná o hodnoty měření nebo informace o stavu prvku.

2.2 Služby pro širokopásmovou komunikaci

Zastoupení standardů v oblasti širokopásmové komunikace není tak velké jak tomu je u úzkopásmové komunikace. Jedná se především o nestandardizovaná řešení sdružení různých výrobců. Zaměření širokopásmové komunikace je odlišné a doposud se s touto technologií v budoucích systémech smart grid nepočítá. Oblast použití této technologie je hlavně v odvětví smart home, které je paralelně rozvíjeno společně se smart grid.

2.2.1 Požadavky širokopásmové komunikace

Širokopásmová technologie sebou přináší možnost využití větší šířky pásma a tím pádem i služeb, které u úzkopásmové technologie z technologických důvodů není možné využít. Základní požadavky na širokopásmovou komunikaci PLC byly například shrnuty v [55]. Mezi tyto požadavky je možné zahrnout:

- spojově orientované služby s konstantním tokem dat (např. audio služby),
- nespojově orientované služby bez podpory kvality služeb (např. Internet),
- služby spojené s technologií PLC (např. management sítě),
- datové toky s podporou zajištění kvality služeb (VBR služby).

Snahou širokopásmové PLC komunikace je pokrytí standardních služeb, které nabízí rozšířený Ethernet.

Potenciál využití této technologie je značný. Důkazem je i vzrůstající rozšířenost této technologie u koncových uživatelů [33]. Spojení širokopásmové a úzkopásmové technologie může mít potenciál do budoucna, který snad přinese internetové služby i do oblastí u kterých se doposud předpokládalo, že budou sloužit pouze pro jednoúčelovou automatizaci.

3 CÍLE DISERTACE

Myšlenka využití stávajících elektrických rozvodů pro datový provoz byla znovu oživena v devadesátých letech dvacátého století. Od té doby bylo realizováno několik pilotních projektů, které vyústily v komerční standardy převodníků rozšířeného Ethernetu do silnoproudé sítě [54].

Z analýzy stávajícího stavu v oblasti PLC vyplývá, že komerční řešení se ve většině případů nechala inspirovat bezdrátovými a ethernetovými technologiemi, ačkoli prostředí je trochu odlišné. Je patrné, že oblast přístupové vrstvy není tolik probírána, jak tomu je např. u bezdrátových řešení. Je to jeden z důvodů, proč se tato práce zaměřuje právě na technologii PLC a její přístupovou vrstvu. Přístupová vrstva v sítích PLC se totiž ve značné míře opírá o řešení, která jsou sice známá, avšak byla realizována v době, kdy počítačové sítě byly využívány v mnohem menší míře.

Problematika PLC komunikace je rozsáhlá. Jedny z nejznámějších problémů této technologie jsou obecné rušení podružných služeb, které se v daném pásmu provozují (rádio, televize atp), a efektivní využití sdíleného média. Tato práce se zaměřuje na problematiku efektivního využití společného média a s tím spojenou přístupovou vrstvu.

Cíle disertační práce byly proto stanoveny následovně:

- *Rozbor stávajícího prostředí, v kterém PLC komunikace probíhá.*

Bude proveden rozbor stávajícího prostředí, v kterém se datová komunikace po silnoproudém vedení vyskytuje. Bude poukázáno na nejčastější problémy, s kterými se PLC komunikace potýká.

- *Přehled současného stavu - analýza stávajících protokolů přístupové vrstvy širokopásmové technologie.*

S ohledem na zaměření práce, se práce bude zabývat minulými i současnými trendy v oblasti protokolů přístupové vrstvy. Podrobně bude provedena klasifikace a analýza protokolů, metod a přístupů, které jsou využívány v širokopásmové PLC komunikaci.

- *Analýza stávajících protokolů přístupové vrstvy úzkopásmové technologie.*

Pro doplnění komplexnosti práce, se bude práce zabývat rovněž minulými i současnými trendy v oblasti protokolů přístupové vrstvy, které jsou využívány v oblasti úzkopásmové PLC komunikace.

- *Analýza a simulace vnitřních funkcí backoff algoritmů u metody CSMA/CA.*

Podrobně bude provedena analýza a simulace vnitřních funkcí backoff algo-

rytmů. Poté bude provedeno jejich vzájemné porovnání.

- *Analýza a simulace přístupové metody CSMA/CA zastoupené v technologii HomePlug.*

S ohledem na kapitolu průzkumu přístupových metod, bude podrobně analyzována technologie HomePlug, která je v současné době nejrozšířenější v oblasti poskytování širokopásmových služeb v PLC. Algoritmus této metody bude porovnán s bezdrátovou technologií IEEE 802.11b, z kterého vychází.

- *Optimalizace přístupové metody v technologii HomePlug.*

Technologie HomePlug do vnitřních funkcí přístupové metody nevnáší závislost na zatížení sítě. Doposud publikované modely a optimalizace této metody se vydaly spíše směrem optimalizace velikosti okna. Práce bude navazovat na tyto publikace a představí jiný směr optimalizace pomocí distribučních funkcí, do kterých bude vnesena závislost na zatížení sítě.

- *Nový model technologie HomePlug.*

Současné analytické modely jsou realizovány na bázi Markovových modelů. Bude představen nový aproximační model systému HomePlug, jehož výsledky a budou porovnány s technologií HomePlug. Za tímto účelem bude realizováno simulační ověření.

V závěru práce bude provedeno zhodnocení a vysloven závěr využití modelu popř. možných optimalizací algoritmu přístupové metody pro komunikaci v PLC. Nedílnou součástí závěru práce bude zhodnocení předpokládaných přínosů práce.

Řada dílčích výsledků již byla publikována na mezinárodních konferencích a časopisech v průběhu doktorského studia autora. Na část z těchto publikací je v práci průběžně odkazováno.

4 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PŘÍSTUPOVÁ VRSTVA

Přístupová metoda komunikačních technologií je složena z přístupových metod a protokolů. Nedílnou součástí práce je proto hlubší analýza těchto metod a analýza stávajících protokolů přístupové vrstvy.

4.1 Protokoly přístupové vrstvy

Protokoly přístupové vrstvy jsou algoritmy pro mnohonásobný přístup k médiu. Jejich úkolem je především efektivním způsobem zajistit bezproblémový a bezkolizní oboustranný přenos dat na společném médiu, které je využíváno více zdroji. MAC protokoly jsou děleny standardně do dvou základních skupin [58].

- Protokoly s pevně daným přístupem.
- Protokoly s dynamickým přístupem.

4.1.1 Protokoly s pevně daným přístupem

Tyto protokoly se snaží zajistit pro každý uzel pevně stanovenou síťovou kapacitu tak, aby síťová zátěž byla rovnoměrně rozložena pro všechny uzly se stejnou pravděpodobností. Tímto způsobem je zaručeno, že každý uzel v síti má garantovanou přenosovou kapacitu v daném časovém úseku. Tento datově orientovaný přístup je zejména vhodný tam, kde jsou předem známy datové toky v síti. Jedná se především o standardizované odečty dat apod.

4.1.2 Dynamické protokoly

Tyto protokoly mohou být rozděleny na dvě základní kategorie.

- Protokoly soutěživé.
- Protokoly s rozhodováním.

Protokoly soutěživé se vyznačují nedeterministickým a zcela náhodným přístupem. Bez ohledu na předcházející stav se snaží zahájit komunikaci. To s počtem prvků v síti zvyšuje i počet kolizí, které pak zpožďují odeslání datových jednotek.

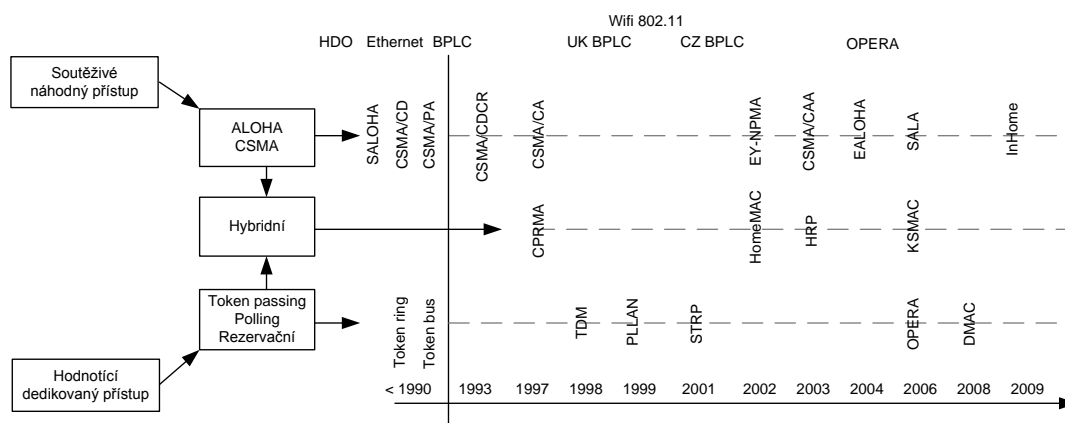
Protokoly s rozhodováním se snaží zajistit náhodný, ale zajištěný, přístup k médiu s možností rezervací síťových prostředků. Tímto způsobem je dosaženo nižšího počtu kolizí.

4.1.3 Vývoj v oblasti přístupových protokolů pro technologii PLC

Pro úplnost je přiložen základní seznam přístupů, které byly testovány, autorizovány nebo které jsou využity v současných přístupech v industriálním nebo domácím prostředí.

Oblast vývoje MAC protokolů pro silnoproudá vedení je zachycena na Obr. 4.1. V tomto časovém diagramu je zaznamenána většina přístupových protokolů, které byly vyvinuty pro oblast PLC. Mnoho autorů a vývojových týmů je ovlivněno především protokoly pro bezdrátové sítě, ze kterých většina nově vyvinutých protokolů vychází [93]. Je to dáno především modulačními technikami, které jsou v PLC obdobné jako v bezdrátových technologiích. Důkazem tohoto faktu je i komparativní studie autorů Lin a spol [68], kteří se zaměřili právě na oblast bezdrátových sítí a datové komunikace PLC.

Přelomovým rokem pro oblast zájmu PLC byl rok 2000. V tomto roce začala Evropská unie danou technologii důrazněji prosazovat a výzkum a vývoj se částečně přesunul z oblasti bezdrátových systémů do oblasti silnoproudých vedení. Příkladem může být projekt REPLI [95], který byl již ukončen. Další projekty, které byly a jsou realizovány: OPERA [77] a PRIME Alliance [84]. Ty vznikly za účelem standardizace širokopásmové komunikace a nových přístupů v úzkopásmové technologii.



Obr. 4.1: Časový diagram vývoje přístupových protokolů pro technologii PLC.

➤ Soutěživé protokoly

Základními algoritmy hromadného přístupu na společné médium jsou ALOHA [18], slotted ALOHA [85] a CSMA/CD [62], které vznikly ještě před rokem 1990. Na základě mechanismu těchto algoritmů byla pak vyvinuta řada dalších protokolů

především pro bezdrátové technologie, které byly standardizovány organizací IEEE jako 802.11. Jedná se především o algoritmus CSMA/CA [63], který je v PLC sítích také některými fyzickými zařízeními podporován (viz Tab. 4.2).

O řadu let později vznikaly různé modifikace zmiňovaných algoritmů. Protokol EY-NPMA [38] byl původně určen pro bezdrátové sítě [47] a jeho základy jsou založeny na základech rodiny protokolů CSMA. Pro svoji realizaci zavádí při vstupu na médium tři nezávislé podmínky. Uzel, který se pokouší o přístup na médium, musí splnit minimálně dvě z těchto podmínek. První podmínkou je, aby byl kanál při vstupu volný. Druhou podmínkou je, aby byl uzel synchronizován. Třetí podmínkou je, aby se na daném médiu nenacházely skryté uzly. Implementace pro silnoproudá vedení, která byla autory Dimitriadis a spol. představena [38], třetí podmínku vynechává. Z tohoto důvodu stačí, aby uzel splnil první dvě podmínky. Autor Hrasnica a spol se v roce 2003 zaměřil především na analýzu protokolů ALOHA [55]. Při analýze MAC protokolů založených na mechanismu ALOHA autoři zjistili, že algoritmy postavené na těchto základech, mohou být vhodné pro nasazení jednoúčelových systémů [39].

Autoři Wang a spol. [101] se ve své práci, při návrhu protokolu InHome, zaměřili především na fyzické rozčlenění powerline sítě. V síti identifikují několik druhů uzlů, kterým pak přiřazují různou prioritu přístupu na společné fyzické médium. Hlavním prvkem v síti je repeater, který odděluje především mezilehlé uzly a zajišťuje tak problematiku řešení skrytého uzlu.

Dalšími protokoly, které byly v této kategorii MAC protokolů vyvinuty, jsou protokoly CSMA/PA, CSMA/CDCR, CSMA/CAA, EALOHA, popř. SALA [75, 42, 93, 30, 40].

Shrnutí soutěživých protokolů

Po provedení důkladné analýzy [56] lze konstatovat, že standardní soutěživý způsob přístupu více uživatelů na společné médium není zpravidla schopen dobře využít danou síťovou zátěž. Přímá implementace těchto protokolů není příliš vhodná, zejména pro obtížnou realizaci zabezpečení kvality služeb [70].

➤ Protokoly s dedikovaným přístupem

Mezi další rozšířenou skupinu protokolů přístupových vrstev pro společně sdílená média jsou protokoly vyznačující se dedikovaným přístupem. Na tomto mechanismu jsou realizovány základní protokoly předávání tokenu. V takovém mechanismu komunikuje ten účastník komunikace, který disponuje v danou chvíli právy na komunikaci - tokenem. V tomto případě jsou vyloučeny kolizní stavy, protože je vyloučena

vzájemná komunikace dvou a více prvků sítě v jednu chvíli [94]. Technologie, které jsou na daném principu postaveny a byly realizovány již před rokem 1990, jsou IEEE 802.4 Token Bus [19] a IEEE 802.5 Token Ring [20].

Jeden z prvních protokolů, který byl vyvinut pro PLC v oblasti dedikovaného přístupu je protokol PLLAN [32]. Tato publikace se zaměřuje na řízení přístupu v powerline sítích, avšak definuje celou strukturu komunikačních vrstev a tím doplňuje definici vrstev PLC i nadvrstvou MAC. Jedná se o modifikovanou metodu token bus [19] s upraveným rámcem LLC vrstvy, který obstarává snadnější realizaci řízení. Komunikující uzly jsou numericky označeny v komunikačním řetězci a tvoří virtuální kruh. Token je pak inkrementační funkcí předáván od nejnižšího čísla k nejvyššímu a z něj je zpět předán na počátek komunikace. Token je uzlu nechán po dobu potřebnou k přenosu zprávy. Po odeslání zprávy je pak předán dalším. Z pohledu funkčnosti je zřejmé, že může docházet k nespravedlivému způsobu sdílení prostředků z důvodu absence segmentace zpráv.

Konsorcium Opera [77] při dokončení strategické fáze 1 publikovalo jeden z prvních relevantních výsledků v oblasti moderního přístupu pro datové komunikace v silnoproudých sítích [34]. Protokol definuje v síti hlavní uzel, který komunikuje s uzly podřízenými a uděluje práva na komunikaci. Podřízené uzly žádají hlavní uzel o rezervaci síťových prostředků a ten na základě vnějších podmínek v síti tato práva přidělí.

Tato oblast vývoje byla následně podpořena vývojem i dalších protokolů. Protokol STRP [89], který byl určen pro LAN síť a byl implementován v PLC. R-TDMA [67], který z části patří do oblasti hybridních protokolů. Protokol TDMPLC [103], který rozděluje pásmo na dva kanály, z nichž jedno odpovídá standardu IEC/TS 67334 [61] a druhé IEEE 802.11e [22]. Další zástupce v této oblasti je protokol DMAC [87], který využívá chování OFDM a testuje jeho jednotlivé subkanály. Posledním standardizovaným přístupem je draft organizace ITU G.9961 [64], který je stále však ve fázi změnových návrhů.

Shrnutí protokolů s dedikovaným přístupem

Z analýzy plyne, že vývoj v této oblasti je stále ve středu zájmu výzkumných týmů. Protokoly s dedikovaným přístupem dokáží elegantněji zajistit kvalitu služeb [1], která je rovněž očekávána od technologie PLC. Řešením by mohly být protokoly hybridní, které se snaží z obou oblastí vytěžit maximum.

➤ Hybridní protokoly

Hybridní protokoly jsou v porovnání s předešlými skupinami relativně novou oblastí. Rámcově se tato oblast začala seskupovat až v pozdějších letech, i když některé

verze protokolů v druhých skupinách již vykazují vlastnosti z oblasti hybridních protokolů. Hybridní protokoly se snaží z obou předešlých oblastí přebírat kladné vlastnosti a aplikovat je společně do jednoho mechanismu.

Jeden z prvních zástupců, který byl v této oblasti realizován a byl aplikačně použit v PLC je protokol CPRMA [25], původně určený pro bezdrátové sítě. Na základě tohoto protokolu, byl realizován hybridní protokol HRP [26], podle kterého je prováděna rezervace síťových prostředků na základě náhodného přístupu. Protokol byl realizován stejnou výzkumnou skupinou jako předcházející vzor.

Před protokolem HRP byl autory Hwang a spol. představen protokol HomeMac [60], který se snaží standardizovat obecnou síť smart home domácnosti s důrazem na zajištění kvality služeb. Počátek komunikace je v protokolu realizován přístupem CSMA/CD. Po navázání komunikace dochází k přepnutí do token módu s vloženým potvrzováním.

Dalším ze zástupců přístupových protokolů, který byl v oblasti hybridního přístupu realizován je protokol KSMAC [80]. Protokol má být součástí korejského standardu KS X 4600-1 [102] pro širokopásmovou komunikaci PLC, avšak nebyl stále standardizován a je ve vývoji [66].

Dalším významným protokolem v této oblasti je americký patent číslo 559817 a multikanálový protokol pro výměnu dat PLX [100], který integruje přístupovou vrstvu do vrstvy transportní. Tímto způsobem se snaží ušetřit síťové režijní náklady, které s počtem vrstev přibývají.

Dalšími protokoly, které jsou v této oblasti, jsou protokoly organizace IEEE pod standardizačním draftem IEEE1901 [46] a jeho nejnovější klon s upravenou správou režijních zpráv [81]. Protokol je inspirován protokolem CSMA/CA a TDMA přístupem.

Shrnutí protokolů s hybridním přístupem

Snahou hybridních protokolů je zajistit unikátní vlastnosti náhodného a dedikovaného přístupu a integrovat je v jeden ucelený mechanismus. Oblast výzkumu a vývoje v této kategorii, je v porovnání s předešlými protokoly, relativně nová. První výzkumy ukazují, že výsledky realizovaných hybridních přístupů mohou zajistit adekvátní zajištění kvality služeb, které je v této oblasti vyžadováno.

Protokoly využívané v praxi - závěr

Z plošné analýzy protokolů vyplývá, že snahou standardizačních organizací, je zajistit dlouhodobě perspektivní protokoly, které budou robustní, jednoduše integrovatelné a budou zajišťovat kvalitu služeb v síti. Některé standardizované protokoly pro oblast powerline sítí z jiných států jsou postaveny na bázi hybridních mechanismů,

které tyto vlastnosti nabízí. To může značit, že právě tato kategorie je řešením pro integraci moderních služeb do PLC. Důkazem toho je i Evropské konsorcium Opera, jehož první výsledky v oblasti přístupové vrstvy směřují do okruhu hybridních protokolů.

Řada standardizačních organizací se také opírá o vyzkoušená, ověřená a známá řešení, která fungují desítky let i v jiných technologiích. Jedná se především o algoritmus CSMA/CD a CSMA/CA, který jsou podpořeny normami CENELEC, ANSI a ISO. Přehled protokolů, které jsou obsaženy v zakotvených standardech, shrnuje Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Porovnání PLC technologií z hlediska přístupového protokolu a použitých modulací.

Standardy	Rok	Kategorie přístupu	Protokol přístupu	Fyzická vrstva
IEEE P1901 (IEEEP1901) *	2008	hybridní	P1901	OFDM
ITU G.9961 (g9961) *	2010	dedikovaný	G9961	OFDM
IEC 61334-5-1 (iec91334)	2001	dedikovaný	TDMA	S-FSK
CENELEC EN50090	2003	náhodný	CSMA/CA	S-FSK
ANSI 709.2	2006	náhodný	CSMA/CD	BPSK
CEA-600.31	1998	náhodný	CSMA/CD	PWM
ISO/IEC DIS 12139-1	2009	náhodný	CSMA/CA	MCM

* řešení, která jsou ve fázi přijímání - nebyla ještě standardizována

Řada průmyslových řešení však přináší vlastní realizace, které nevycházejí ze standardů a snaží se tak zajistit koexistenci vlastních produktů [76]. Tab. 4.2 shrnuje aktuální komerční řešení, která většinou vychází ze standardů, avšak drobnými zásahy do fyzické a přístupové vrstvy se stávají unikátními řešeními [99, 76].

Výjimku z výčtu řešení tvoří organizace OPERA a Prime, které se snaží díky široké podpoře a většímu konsorciu prosadit vlastní řešení, realizované na bázi stávajících standardů.

V Kap. 4.1 byly shrnuty přístupové metody pro širokopásmovou a úzkopásmovou PLC komunikaci. Rekapitulací těchto údajů je možné konstatovat, že v komerčním řešení širokopásmových realizací převažují algoritmy s náhodným přístupem. V této analýze se do jisté míry může tato práce opřít o technickou zprávu aliance Opera [76]. Jedná se především o klony algoritmu CSMA. Podrobnějším shlednutím výsledků pro úzkopásmovou komunikaci je možné konstatovat, že zde je směr vývoje směřován rovněž do oblasti náhodného přístupu. Výjimku tvoří organizace PRIME, která pro

Tab. 4.2: Porovnání komerčních PLC technologií z hlediska přístupového protokolu a použitých modulací.

Komerční řešení	Rok	Kategorie	Protokol	Fyzická vrstva
OPERA	2006	dedikovaný	OPERA, TDMA, TDD	OFDM
DS2	2007	dedikovaný	token-based TDMA	OFDM
Panasonic BL PA300	2008	náhodný	CSMA/CD	wavelet OFDM
HomePlug 1.0	2000	náhodný	CSMA/CA	OFDM
HomePlug AV	2005	hybridní	CSMA, CA+TDMA	FFT-OFDM
Ytran	2007	dedikovaný	CSMA/CAAB	DCSK (Yitran)
Prime	2009	dedikovaný	TDMA	S-FSK

svůj první draft standardu přístupové metody použila časově oddělené kanály. Tímto způsobem je dosaženo rovnoměrného a spravedlivého rozprostření síťové zátěže mezi všechny mezilehlé uzly sítě. S ohledem na tyto výsledky, bude podrobně analyzována přístupová metoda CSMA v technologii HomePlug.

4.2 Přístupová metoda CSMA

Za účelem optimalizace a simulace přístupové metody pro PLC bude podrobně analyzována komerčně nejrozšířenější technologie přístupu v silnoproudých sítích, technologie HomePlug. Ta využívá přístupovou metodu CSMA/CA. Proto jsou zde shrnuty základní informace o CSMA.

Mnoho MAC protokolů pro PLC bylo odvozeno z bezdrátových LAN sítí a ze sítí Ethernet. Protokoly postavené na bázi CSMA před vysíláním naslouchají medium. V případě, že je médium volné, buď zahájí komunikaci nebo vyčkají náhodný časový interval a začnou vysílat svá data. Podle způsobu správy kolizí jsou protokoly standardně rozlišovány na:

- protokoly s detekcí kolize (Collision Detection),
- protokoly s předcházení kolize (Collision Avoidance),
- protokoly s bitovou arbitráží (Bitwise Arbitration),
- protokoly s prevencí kolizí (Prevent Collision).

V oblasti datových komunikací po silnoproudém vedení jsou využívány především první dva způsoby. Z tohoto důvodu budou uvažovány pouze tyto dva způsoby CSMA přístupu.

Další, obecnější, rozdělení CSMA protokolu je na *nonpersistentní* a *persistentní*. V nejrozšířenějším komerčním řešení širokopásmové komunikace Homeplug 1.0 a AV [51, 53] je použita nonpersistentní varianta CSMA/CA.

4.3 Backoff algoritmy - distribuční koordinační funkce

V předcházející kapitole byly stručně shrnuty základní přístupové metody, používané v moderních komunikačních systémech. S přístupovými algoritmy značně souvisí přístupový mechanismus, backoff algoritmus, který funkcionálně doplňuje metodiky přístupu. Backoff algoritmus udává ve většině případů čas přístupu na společně využívané médium. Výjimku tvoří časově oddělené kanály s explicitně definovaným přístupem.

Pro generování náhodného přístupu slouží v technologiích speciální funkce, vracějící náhodnou veličinu, `rand()` funkce. Princip funkce je zřejmý. Dle specifického náhodného rozložení veličiny vrátí funkce, po jejím zavolání, požadovanou hodnotu z předem definovaného intervalu $X_i = \langle x_{min}, x_{max} \rangle$. Získáním této hodnoty technologie ve většině případů definuje náhodný přístup t_i na základě algoritmu přístupu. V bezdrátových technologiích nebo v technologii HomePlug se jedná o časovou jednotku získanou na základě $t_i = X_i \cdot TS$, kde TS je jednotka časového timeslotu. Ta je definována standardy. V technologiích IEEE 802.11b a HomePlug je tato hodnota rovna $20 \mu s$ resp. $35.84 \mu s$ [52, 21].

S generováním náhodných hodnot úzce souvisí pravděpodobnostní rozdělení, které de facto určuje s jakou pravděpodobností bude ta či ona hodnota z intervalu náhodné funkce vrácena. Ve většině případu se jedná o uniformní náhodné rozdělení. To určuje, že každá hodnota definovaného intervalu x_i bude mít pravděpodobnost $p_i = \frac{1}{x_{max} - x_{min}} \forall i \in \langle x_{min} \rightarrow x_{max} \rangle$. Pro oblast bezdrátových a sítí Ethernetu byly samozřejmě zkoumány i jiné distribuční algoritmy. Příkladem může být algoritmus pro bezdrátové technologie BEBA [59], který pro generování náhodných čísel využívá exponenciální rozložení.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny základními typy distribučního rozložení, které je možné v komunikačních systémech využívat pro generování náhodných čísel. Pro generování časových okamžiků jsou využívány spojitě distribuční funkce. Tyto okamžiky jsou pomocí násobení a vhodného zaokrouhlování převáděny na kladná celá čísla X_i (v případě klasických metod CSMA/CA v IEEE 802.11b

a HomePlug). V závěru jsou analyzovány zaokrouhlovací funkce, které mohou tato rozložení mírně modifikovat.

4.3.1 Uniformní náhodné rozdělení

Uniformní náhodné rozdělení je využito ve většině komunikačních systémů, pro náhodný přístup ke společně využívanému médiu. Náhodná veličina X má uniformní rozložení právě tehdy, když je hustota pravděpodobnosti určena vztahem

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{pro } x \in \langle a, b \rangle \\ 0 & \text{pro } x \notin \langle a, b \rangle \end{cases} \quad (4.1)$$

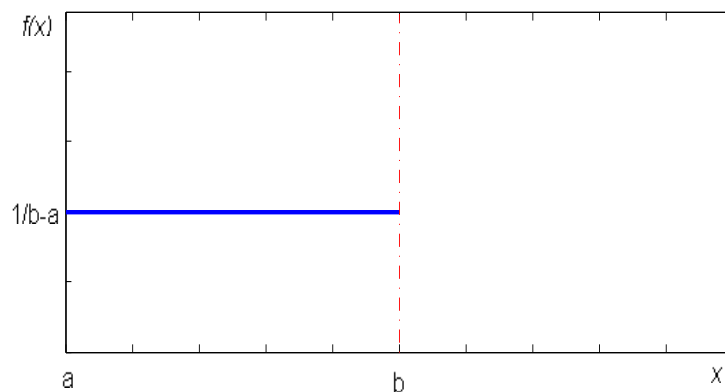
kde a je minimální hranice definovaného intervalu a b je maximální hranice definovaného intervalu. Na Obr. 4.2 je grafické rozobrazení hustoty uniformního rozložení. Každá hodnota intervalu nabývá ustálené, rovnoměrné, pravděpodobnosti, jejíž velikost je dána hodnotami definovaného intervalu.

Střední hodnota tohoto rozložení je definována jako polovina součtu minimální a maximální hranice definovaného intervalu

$$E(x) = \frac{a+b}{2}. \quad (4.2)$$

Rozptyl rovnoměrného rozložení má hodnotu

$$D(x) = \frac{(b-a)^2}{12}. \quad (4.3)$$



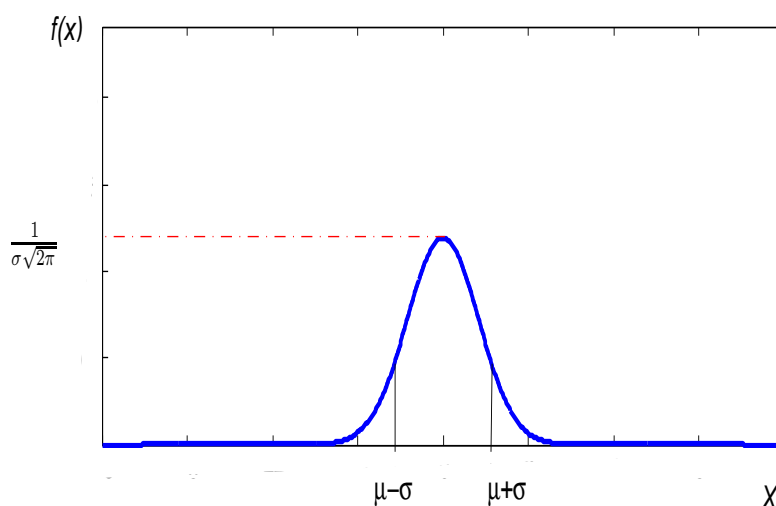
Obr. 4.2: Hustota rozložení uniformní funkce.

4.3.2 Normální, Gaussovo, rozdělení

Gaussovo, označováno také obecně normální rozdělení, má zvonovitý tvar uveden na Obr 4.3. V technologiích pro generování hodnot backoff algoritmu je rovněž obsaženo, ale spíše se vyskytuje pro generování náhodných veličin na fyzické vrstvě. Náhodná veličina X má normální rozdělení právě tehdy, když hustota pravděpodobnostní funkce $f(x)$ má tvar

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \text{ pro } x \in (-\infty, \infty), \quad (4.4)$$

kde μ udává střední hodnotu a určuje maximální hladinu křivky. Parametr σ udává směrodatnou odchylku a určuje vzdálenost inflexních bodů od středu (roztažení křivky do šířky). Dalším důležitým významem tohoto rozložení je jeho aproximační schopnost emulovat jiná známá rozložení. Využívá se především v systémech pro generování chyb.



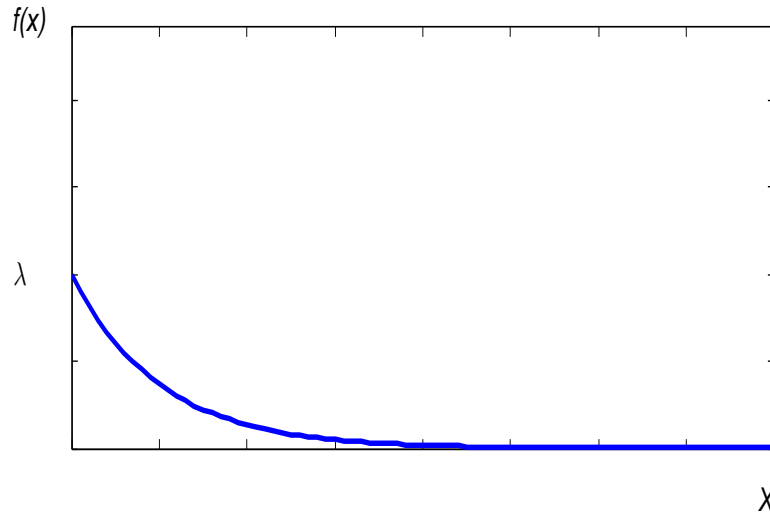
Obr. 4.3: Hustota funkce normálního rozložení.

4.3.3 Exponenciální náhodné rozdělení

Exponenciální rozdělení pravděpodobnosti je vhodné pro časové intervaly s dobou dobíhání náhodného jevu. Představuje délku intervalu mezi dvěma jevy, např. doba čekání na obsluhu. Náhodná veličina x má exponenciální rozdělení právě tehdy, když hustota pravděpodobnostní funkce $f(x)$ má tvar podle

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < 0 \\ \lambda \cdot e^{-\lambda x} & \text{pro } x \geq 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Grafické znázornění hustoty funkce má tvar exponenciály Obr. 4.4



Obr. 4.4: Hustota funkce exponenciálního rozložení.

Střední hodnota tohoto rozložení je definována jako převrácená hodnota parametru λ

$$E(x) = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.6)$$

Rozptyl rovnoměrného rozložení je definován jako druhá mocnina převrácené hodnoty parametru λ

$$D(x) = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (4.7)$$

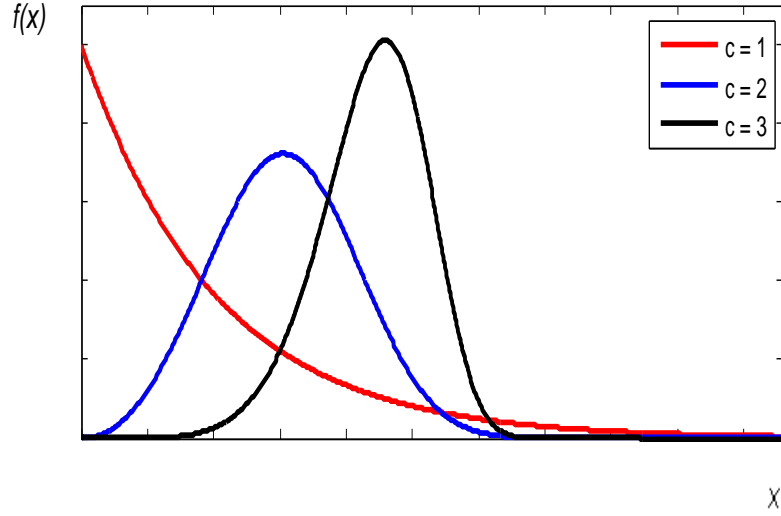
4.3.4 Weibullovo náhodné rozdělení

Weibullovo rozdělení je řazeno spíše do druhotných náhodných rozdělení. Prioritní rozdělení, která jsou využívány ve větší míře, jsou uvedeny výše. Weibullovo rozdělení je spíše využíváno v mechanice při únavě materiálu, zde je však zmiňováno z jiného důvodu.

V porovnání s normální rozdělením, se jedná rovněž o jedno z typů rozdělení, které je velmi variabilní a pomocí vkládaných parametrů jej lze modifikovat na různé průběhy průběhů, jak ukazuje Obr. 4.5. Náhodná veličina X má Weibullovo rozdělení s parametry špičatosti δ a šikmosti c , jestliže její hustota pravděpodobnosti má tvar

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x \leq 0 \\ \frac{c \cdot x^{c-1}}{\delta^c} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\delta}\right)^c} & \text{pro } x > 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Střední hodnota tohoto rozložení je definována jako



Obr. 4.5: Hustota funkce Weibullova rozložení.

$$E(x) = \Gamma\left(\frac{1}{c} + 1\right) \cdot \delta. \quad (4.9)$$

Rozptýl tohoto rozložení je definován jako

$$(x) = \left[\Gamma\left(\frac{1}{c} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{c} + 1\right) \right] \cdot \delta. \quad (4.10)$$

Speciálním případem Weibullova rozdělení je situace, kdy parametr $c = 1$. V tomto případě se chová toto rozdělení jako Exponenciální, které bylo zmiňováno v předchozí kapitole. Z důvodu variability, bude toto rozdělení využito i při realizaci adaptivního okna technologie HomePlug.

4.3.5 Vnitřní zaokrouhlovací funkce

V systémech s náhodnými procesy se využívají diskrétní nebo spojité distribuční rozdělení. V konkrétním případě generování hodnot backoff algoritmu pro získání časových okamžiků se využívají funkce pro generování nezáporných celých čísel $X_i \in \mathbf{N}$. Ta jsou pak převáděna na konkrétní časové okamžiky t_i pomocí vztahu $t_i = X_i \cdot TS$, kde TS je jednotka časového timeslotu. S ohledem na numerickou analýzu budou generována náhodná čísla z intervalu $(0, i_{max})$, kde i_{max} je definována využitým pravděpodobnostním rozdělením. Ve většině případů je $i_{max} = 1$. Nechť je dána funkce `rand()`, která vrací náhodná čísla z předkládaného intervalu $x_i \in (0, i_{max})$, kde $x_i \in \mathbf{R}^+$.

Nezáporné celé číslo X_i z intervalu $(0, CW_{max})$ je získáno pomocí

$$X_i = \text{round}(CW_{max} \cdot \text{rand}()), \quad (4.11)$$

kde funkce `round()` je funkce zaokrouhlovací, vracející nezáporná celá čísla $X_i \in \mathbf{N} \in (0, CW_{max})$.

V prostředí Matlab, který je využíván v práci pro tuto analýzu algoritmů, jsou využívány tyto zaokrouhlovací funkce:

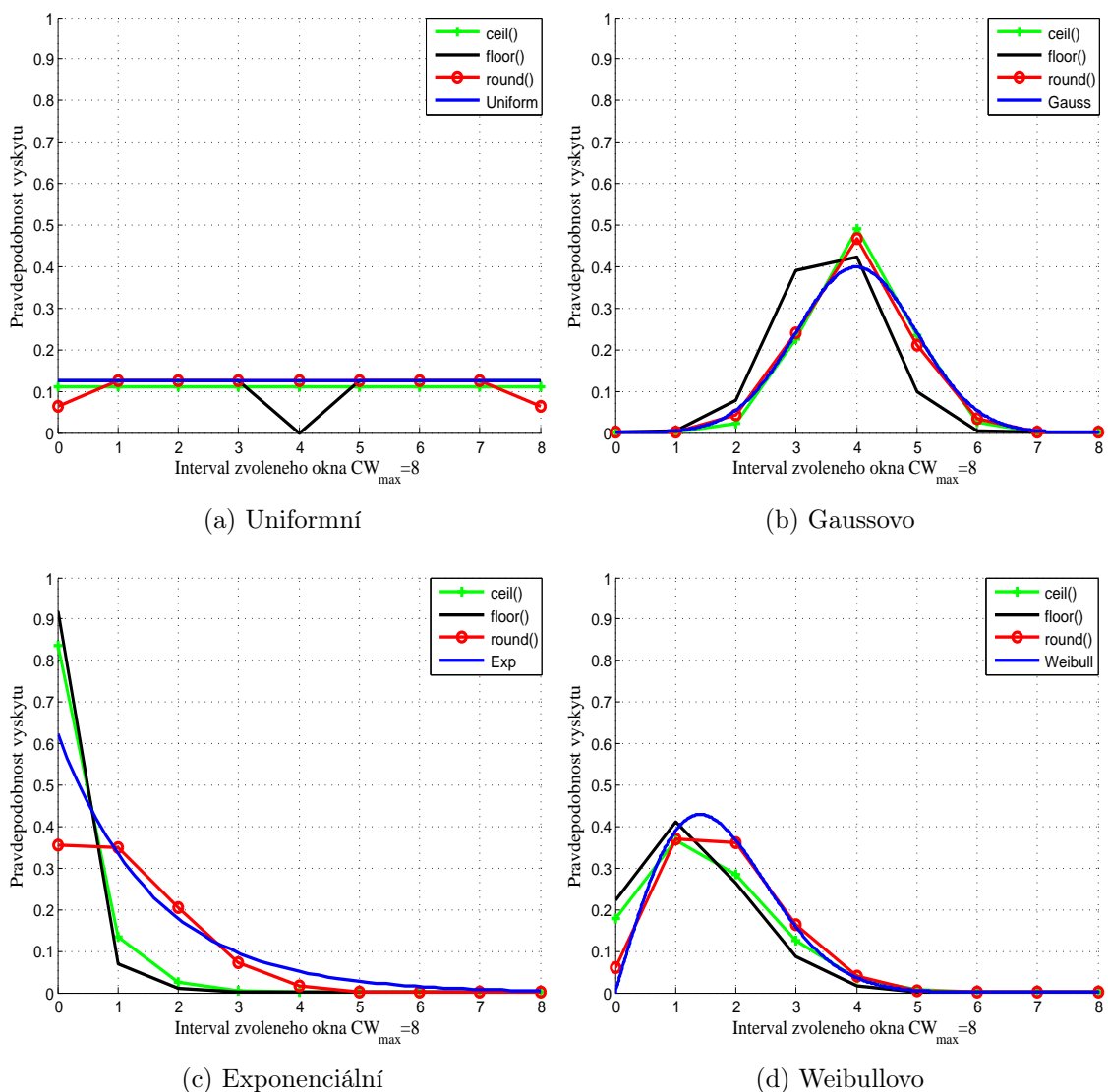
- `CEIL()` - \uparrow zaokrouhluje na nejbližší integer směrem nahoru směrem ke kladnému nekonečnu.
- `ROUND()` - \leftrightarrow zaokrouhluje na nejbližší integer směrem dolů, je-li desetinná část vygenerovaného čísla x_i v intervalu $x_i \in \langle 0, 0.49 \rangle$ a směrem nahoru je-li desetinná část vygenerovaného čísla x_i v intervalu $x_i \in \langle 0.5, 0.9 \rangle$.
- `FIX()` - \downarrow zaokrouhluje desetinná čísla směrem k nule.
- `FLOOR()` - \downarrow zaokrouhluje desetinná čísla směrem k zápornému nekonečnu.

Je zřejmé, že funkce `fix()` a `floor()` se budou oblasti kladných reálných čísel \mathbf{R}^+ chovat stejně. Budou vždy tato čísla zaokrouhlovat směrem dolů k nule. Rozdíl v těchto funkcích je až v oblasti záporných reálných čísel \mathbf{R}^- .

Z výše uvedených důvodů, byla provedena analýza zaokrouhlovacích funkcí v prostředí Matlab u jednotlivých distribučních rozdělení. Výsledky analýzy jsou zobrazeny na Obr. 4.6. Důsledná matematická analýza vlivu zaokrouhlovacích funkcí na průběhy jednotlivých distribučních rozdělení byla publikována autorem Tricker v [96] již v roce 1984. Tato práce se zaměřuje na numerické potvrzení. Rozložení distribuce bylo nastaveno tak, aby emulovala generování nejnižší velikost backoff algoritmu technologie HomePlug, viz. kap. 5. Proto byl parametr CW_{max} nastaven na velikost $CW_{max} = 8$.

Aby bylo možné potvrdit, že daná náhodná funkce má pravděpodobnostní rozdělení dané funkce, musí být proveden dostatečný počet iterací. Ze zvyšujícím se počtem iterací dochází k upřesňování výsledku. Pro tyto simulace bylo využito 10^7 iterací, což je dostatečný počet nato, aby došlo k ustálení stavu.

Z výsledků vyplývá, že různá rozdělení reagují na různé distribuční funkce odlišně. Při uniformním rozdělení, které je také využíváno v technologii HomePlug, se klasické zaokrouhlování funkcí `round()` projevilo zkosením krajních částí distribuce Obr. 4.6a. Výsledkem tedy není rovnoměrné uniformní rozdělení. Pokud porovnáme charakteristický průběh distribučních funkcí s obdrženými výsledky je možné vidět, že nejbližší k teoretickému průběhu se blížila funkce `ceil()`. Vygenerované rozdělení \vec{x} bylo převedeno na integer vynásobením maximální hodnotou okna $\vec{x}' = \vec{x} \cdot (CW_{max} + 1)$. Obdržená posloupnost byla zaokrouhlena funkcí `ceil()` směrem nahoru. Pro zachování uniformního rozdělení byl od posloupnosti odečten koeficient, který se před zaokrouhlováním přičetl. Výsledkem je uniformní rozdělení,



Obr. 4.6: Vlastnosti zaokrouhlovacích funkcí na různé druhy distribučního rozložení

kteří je sice poníženo, avšak zachovává průběh distribuční funkce Obr. 4.6a, zelený průběh. Podobnou úpravu je možné provést i u zaokrouhlování dolů funkcí `floor()` nebo `fix()`. Pro ukázkou je však ponechána bez algebraických úprav.

Gaussovo normální rozdělení je zobrazeno na Obr. 4.6b. Rozdělení bylo nastaveno tak, aby střední hodnota μ byla rovna polovině požadovaného intervalu $\mu = \frac{1}{2}CW_{max}$. Uspokojivé výsledky jsou obdrženy z funkcí `ceil()` a `round()`. Funkce `ceil()` však musela být podobně algebraicky upravena jako předchozím případem. Funkce `round()` však vrací uspokojivé výsledky i bez dalších algebraických úprav, což v konečném důsledku snižuje výkonnostní nároky na obdržení výsledků. Rozdíl středních hodnot je dán samozřejmě rozlišením průběhu, který je, v případě integeru, daleko nižší.

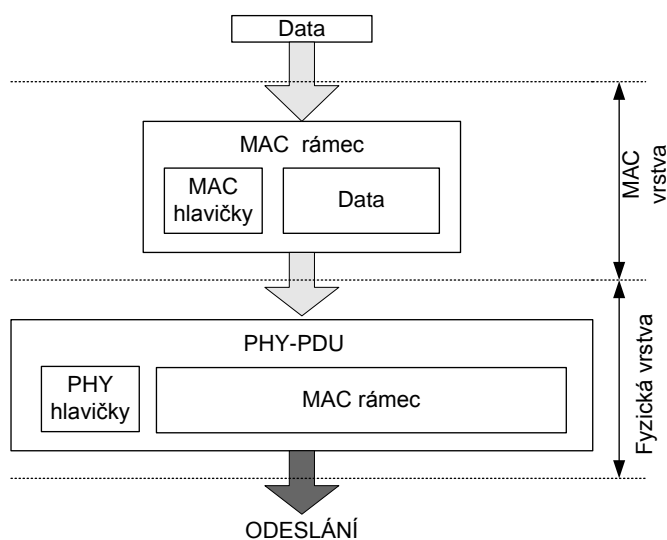
Obdobné chování zaokrouhlovacích funkcí se projevilo i u ostatních distribucí Obr. 4.6c a Obr. 4.6d. Závěrem lze říci, že s obdobných chování zaokrouhlovacích funkcí je vhodné v modelování počítat. Rozdíly ve výsledcích budou patrně ale minimální.

5 ANALÝZA SYSTÉMU HOMEPLUG 1.0

K modelování přístupové vrstvy technologie HomePlug je zapotřebí podrobná analýza. Proto jsou v této kapitole shrnuty základní parametry této technologie. Přístupová metoda v HomePlug je odvozena od schématu CSMA/CA technologie IEEE 802.11b [63]. Zachovává si princip *collision avoidance* - předcházení kolizí, avšak přistupuje k této realizaci jiným backoff algoritmem. Zároveň s tímto algoritmem, jsou detailněji popsány kvantitativní hodnoty systému.

5.1 Princip odesílání dat v technologii PLC

Aby bylo možné odeslat data z vyšších vrstev síťového modelu, musí být tato data, tak jako u jiných technologií, začleněna do nižších vrstev. K datovému bloku z vyšších vrstev jsou v MAC vrstvě přidány nutné hlavičky a identifikátory nezbytné pro komunikaci s protistranou na odpovídající vrstvě síťového modelu. Na obrázku 5.1 je tento proces základního zapouzdření uživatelských dat do rámců přístupové a fyzické vrstvy přiblížen.



Obr. 5.1: Zapouzdřování datových jednotek do vrstev HomePlug.

K datům z vyšší vrstvy je přidána hlavička MAC vrstvy a tvoří tak *MPDU* rámec. Tento rámec je po zpracování zapouzdřen do *PPDU* rámce fyzické vrstvy, ke kterému je také přidána hlavička. V tomto případě se jedná o hlavičky fyzické vrstvy.

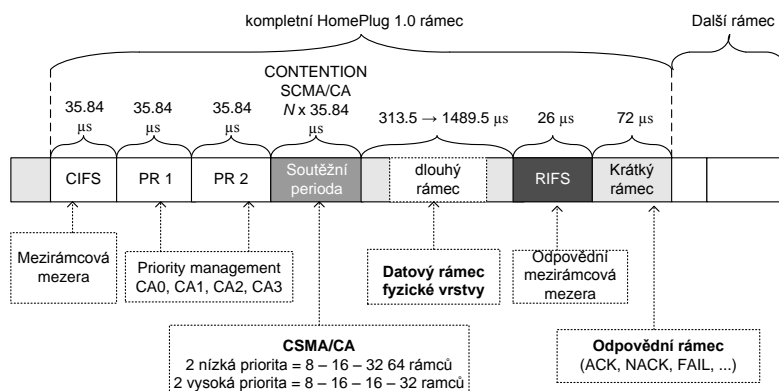
5.2 Rámec fyzické vrstvy HomePlug

Kompletní rámec fyzické vrstvy může být vyjádřen v časové oblasti složením ze dvou základních struktur. Jedná se o fixní složku odpovídající hlavičce a variabilní složku, která představuje data. Při odeslání rámce na fyzické vrstvě je nutné připočítat k datové složce rovněž i dobu trvání backoff algoritmu k zajištění předcházení kolizím. Hodnoty, které tyto složky mohou nabývat, jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 5.1: Časová náročnost rámců fyzické vrstvy.

	fixní	variabilní	soutěžní	celkem
min	$205.52 \mu s$	$+ 313.5 \mu s$	$+ N \times 35.84 \mu s$	$= 519.02 \mu s + (N \times 35.84 \mu s)$
max	$205.52 \mu s$	$+ 1489.5 \mu s$	$+ N \times 35.84 \mu s$	$= 1692.02 \mu s + (N \times 35.84 \mu s)$

Časové vyjádření rámce fyzické vrstvy je doplněno konkrétnějším časovým vyjádřením jednotlivých subsložek fyzické vrstvy, které se podílí na celkovém časovém zpoždění Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Definice rámců fyzické vrstvy v HomePlug [27].

5.2.1 Fixní složky rámce fyzické vrstvy

V následující podkapitole budou podrobněji popsány fixní složky, které vstupují do rámce fyzické vrstvy. Jedná se o složky, které se vztahují k fyzické vrstvě. Nebudou zde tedy popsány datové struktury nadvrstev. Ty zmiňuje následující kapitola MAC vrstvy. Základní fixní složky fyzické vrstvy jsou:

- hlavní mezirámcová mezera (CIFS),
- složky pro prioritní management (PR0 a PR1),

- mezirámcová mezera pro odeslání potvrzení (RIFS),
- potvrzení (ACK, NACK).

CIFS

Mezirámcová mezera je použita pro ustálení a dokončení předchozího vysílaného krátkého rámce. Potom, co uplyne stanovená doba $CIFS = 35,84 \mu s$ může stanice začít s vysíláním dalšího rámce.

PRx

Po uplynutí doby hlavní mezirámcové mezery, stanice definuje dvě časově oddělené události PR0 a PR1. Pomocí těchto událostí každá stanice definuje charakter rámce, jenž má být vysílán. Na základě kombinace těchto bitů, stanice definuje třídu provozu. V základním schématu HomePlug jsou dvě třídy provozu pro výpočet backoff procedury.

Hlavička dlouhého rámce

Pro odeslání dat z vyšších vrstev slouží dlouhý rámec. Data z vyšší vrstvy jsou zapouzdřována do tohoto rámce. K tomuto rámci jsou pak doplněny nutné hlavičky, které jsou prakticky téměř velikostně stejné. Tyto hlavičky jsou minimálně 313,5 μs .

RIFS

Odpovědní mezirámcová mezera je použita pro ustálení a dokončení právě vysílaného dlouhého rámce. Po této době je uzlem, který rámec přijal, vysláno potvrzení. Doba stanovená pro tuto událost je rovna $RIFS = 26 \mu s$.

Krátký rámec

Odeslaná data jsou potvrzována krátkým rámcem. Tento rámec prakticky obsahuje pouze kontrolní pole, které je obsaženo i v hlavičce dlouhého rámce. Tato jsou pole odlišena typem. V případě krátkého rámce je typ kontrolního pole nastaven na potvrzení. Doba trvání krátkého rámce na fyzické vrstvě je 72 μs .

5.2.2 Variabilní složky rámce fyzické vrstvy.

V následující podkapitole budou popsány variabilní složky, které vstupují do rámce fyzické vrstvy. Jedná se o složky, které se vztahují k fyzické vrstvě. Nebudou zde tedy popsány datové struktury nadvrstev, o kterých je zmíněno v části MAC vrstvy. Základní fixní složky fyzické vrstvy jsou:

- soutěžní doba - doba čekání stanice k zahájení vysílání,

- datová složka dlouhého rámce.

Soutěžní doba - doba čekání stanice k zahájení vysílání

Před začátkem vysílání dat uzel vygeneruje dobu čekání k zahájení vysílání. Tato doba je dána backoff algoritmem. Základním parametrem soutěžní doby je timeslot $TS = 35,84 \mu s$. Druhým důležitým parametrem je vygenerovaná velikost okna, která je rovna násobku timeslotu a náhodně vygenerované hodnoty.

Datová složka dlouhého rámce

Datová složka dlouhého rámce je určena k přenosu dat z vyšších vrstev. Tato složka je variabilní a může nabývat hodnoty až $1489,5 \mu s$. Tato hranice je limitována maximální délkou rámce fyzické vrstvy. Pokud jsou data z vyšší vrstvy větší, je zpráva rozdělena na více, po sobě jdoucích, zpráv. Fragmentace dat je zajišťována vyššími vrstvami.

5.3 Rámce MAC vrstvy HomePlug

Existují dva druhy rámců, které jsou definovány v MAC vrstvě technologie HomePlug. Dlouhý rámec, který je využíván pro odesílání dat a krátký rámec, který je využíván pro potvrzování dat. Další podkapitoly tyto rámce více analyzují a přiblíží.

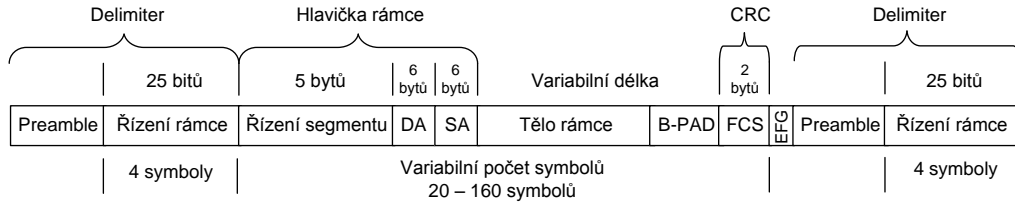
5.3.1 Dlouhý rámec

Dlouhý rámec je složen z [52]:

- návěští,
- řízení rámce,
- řízení segmentu,
- MAC adresy cíle,
- MAC adresy zdroje,
- data,
- výplň,
- kontrolní součet,
- EFG.

Návěští spolu s řízením rámce slouží k zahájení a k ukončení dlouhého rámce. Odlišeny jsou kontrolními bity v poli řízení rámce. Hlavičku tvoří ta pole, která se vztahují k přenášeným datům. Jedná se o pole řízení segmentu a pole pro uložení MAC adres cíle a zdroje. Za hlavičkou je k dispozici prostor pro přenášení dat, který je zakončen výplní na byty a kontrolním součtem. Rámec je před odesláním

ukončovacího segmentu doplněn rámcové mezerou (EFG). Tato hodnota je obvykle $1,5 \mu s$.



Obr. 5.3: Definice dlouhého rámce v HomePlug.

Návěští

Začátek každého rámce je zahájen vysílám návěstím. Každý n prvek návěstí je generován jako

$$S[n] = S(n \cdot T_{sample}) = \frac{sign \cdot w[n] \cdot 2}{\sqrt{84}} \cdot \sum_c \cos\left(\frac{2\pi \cdot (c + 23) \cdot n}{256} + \phi_c\right)$$

pro $0 \leq n \leq 7.5 \cdot 256 - 1$

kde

$$sign = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq 6 \cdot 256 - 1 \\ -1 & 6 \cdot 256 \leq n \leq 7.5 \cdot 256 - 1 \end{cases}$$

a

$$w[n] = w(n \cdot T_{sample}) = \begin{cases} 0.5 - 0.5 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n}{8}\right) & 0 \leq n \leq 7 \\ 1 & 8 \leq n \leq 7.5 \cdot 256 - 8 \\ 0.5 - 0.5 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot (n - 7.5 \cdot 256)}{8}\right) & 7.5 \cdot 256 - 7 \leq n \leq 7.5 \cdot 256 - 1 \end{cases} \quad (5.1)$$

Kde c je podmnožina všech nemaskovaných nosných frekvencí. Více k této problematice je uvedeno v [52].

Řízení rámce

Pole řízení rámce obsahuje informace, které jsou využívány všemi uzly v síti. Pole je definováno 25 bity a tyto složky obsahuje:

- řízení soutěžení - 1bit,
- typ ukončovací značky - 3 bity,
- variabilní pole v závislosti na značce - 13 bitů,
- kontrolní součet řízení rámce - 8 bitů.

Řízení segmentu

Toto 40 bitové pole obsahuje složky, které jsou nezbytné k přijetí rámce a k synchronizaci jednotlivých segmentů. Toto pole obsahuje tyto složky:

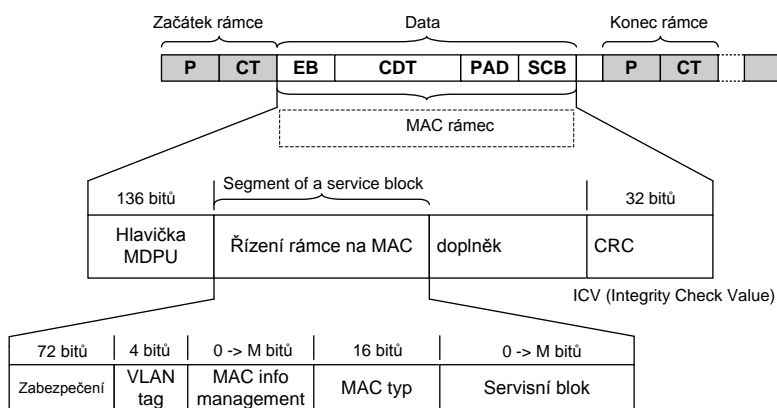
- verze protokolu - 3 bity,
- rezervováno pro další použití - 2 bity,
- multicast Flag - 1 bit,
- priorita kanálového přístupu - 2 bity,
- velikost segmentu 15 bitů,
- označení posledního segmentu - 1 bit,
- číslo segmentu - 6 bitů,
- sekvenční číslo - 10 bitů.

MAC adresy zdroje a cíle.

Pole obsahuje 6 bajtů pro adresu cíle, resp. 6 bajtů pro adresu zdroje. Velikost odpovídá nezkrácené formě standardní 48 bitové ethernetové MAC adresy IEEE 802.3 [62].

Datové pole

Datová část dlouhého rámce je složena ze subsložek, které se především využívají k zajištění bezpečnostních operací a operací zajišťující realizace virtuálních sítí. Tato část tak může nabývat hodnot 96 až N bitů.



Obr. 5.4: Definice datové složky dlouhého rámce v HomePlug.

Datové pole obsahuje tyto složky:

- identifikátor klíče - 72 bitů,
- VLAN tagování - 4 bity,
- MAC management - 0 až M bitů (v závislosti na zprávách),
- délka a typ MAC rámce - 16 bitů
- data z vyšší vrstvy - 0 až 1217 bitů (hodnota po odečtení všech nutných hlaviček).

Datová výplň

Datová výplň se využita v případě zarovnání rámce na požadovanou velikost. Tato část rámce je vyplněna nulovými bity. V případě využívání blokového šifrování, musí být tato velikost zarovnána na násobek 64 bitů.

Kontrolní součet

Jedná se o 16 bitový blok slouží pro zajištění integrity rámce a je vyplněn kontrolním součtem, který využívá standardní generátor CRC

$$G(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1 \quad (5.2)$$

EFG

Rámec, před odesláním ukončovacího segmentu, je doplněn hodnotou EFG (konec rámcové mezery). Tato hodnota nabývá obvykle $1,5 \mu s$.

Ukončení a odeslání rámce

Rámec je ukončen návěštím a řídicím polem. Typ řídicího pole je nastaven na ukončení. Velikost této části je 25 bitů.

5.3.2 Krátký rámec

Tento rámec slouží jako odpovědní zpráva odesílateli a obsahuje status doručení. Krátký rámec je složen z návěští a řídicího rámce. Obě odpovídají popisu zmiňovaném v předchozí kapitole. Rozdíl je v naplnění polí. Typ řídicího rámce je nastaven na potvrzování (ACK, NACK).

5.4 Back-off algoritmus (BF)

BF algoritmus slouží k zajištění bezproblémového přístupu na společně využívané médium. Hlavní funkcí tohoto algoritmu v technologii HomePlug je zajistit, aby rámec, který uzel vyšle, byl bez problému přijat a potvrzen. Za tímto účelem jsou v systému zavedeny mechanismy pro snižování kolizí.

5.4.1 Proměnné vstupující do BF algoritmu

Ke snížení pravděpodobnosti kolize je v BF algoritmu technologie HomePlug zavedena řada proměnných. Hodnoty těchto proměnných pak určují chování přístupu uzlu ke společně využívanému médiumu. Mezi základní parametry BF algoritmu patří:

- BPC - Backoff Procedure Event Counter - počítadlo procedur přístupu.
- BC - the Backoff Counter - počítadlo počtu timeslotů - pokusů poslechu média.

- DC - the Deferral Counter - penalizační počítadlo v případě zaneprázdněného média.
- CW - the Contention Window - velikost okna - počet timeslotů v dané proceduře.

Každá stanice při začátku vysílání inicializuje hodnotu $BPC = 0$ a zvolí náhodné číslo BC z intervalu $BC \in [0, CW_{MAX}]$, kde CW je velikost okna. Hodnota počítadla DC je zvolena v závislosti na hodnotě BPC a stavu média podle Tab. 5.2. Při každé reinicializaci procedurního počítadla jsou hodnoty počítadel BC resp. DC rovněž obnoveny.

Tab. 5.2: The backoff procedure values of HomePlug system.

BPC	Priorities CA3, CA2		Priorities CA3, CA2	
0	DC = 0	$CW(W_0) = 8$	DC = 0	$CW(W_0) = 8$
1	DC = 1	$CW(W_1) = 16$	DC = 1	$CW(W_1) = 16$
2	DC = 3	$CW(W_2) = 16$	DC = 3	$CW(W_2) = 32$
3+	DC = 15	$CW(W_{3...}) = 32$	DC = 15	$CW(W_{3...}) = 64$

Způsob vysílání rámce v HomePlugu pomocí výše zmiňovaných počítadel, lze popsat na pseudokódu daného algoritmu.

Po inicializaci hodnoty počítadel BC a DC je BPC inkrementováno o jedna. Tímto způsobem je stanici zvolena základní soutěžní perioda, při které detekuje médium. Detekce média probíhá vždy po timeslotech, které jsou standardem definovány $ts = 34,84 \mu s$.

- Pokud v daném časovém slotu BF procedury se médium jeví jako nečinné a počítadlo BC není rovno nule, BC je dekrementováno o jedničku, zatímco DC a BPC jsou definovány.
- Pokud je BC rovno nule, stanice začne vysílat. Pokud je médium v daném časovém okamžiku obsazené, hodnoty BC a DC jsou dekrementovány o jedničku.
- Pokud hodnota počítadla $DC < 0$, BPC je inkrementováno na vyšší úroveň dle definované tabulky a obě hodnoty BC a DC jsou reinicializovány. V tomto případě je BC voleno znovu náhodně v definovaném intervalu $[0, CW_{i-1}]$ kde i je odpovídající počet soutěžních kol.

Princip metody je rozsáhlejší a vstupují do něj další proměnné. Ty však v navrženém modelu pozbývají význam. Jedná se např. o počítadlo odvyšlání rámců, které zaručuje, že stanice se nebude snažit v případě neúspěchu daný rámec vysílat do nekonečna. Další počítadla souvisí s fyzickou vrstvou a použitou modulací.

Algoritmus 5.4.1: BACKOFF(BPC)

```
begin
INICIALIZACE_CITACU( $BPC$ )
comment: inicializace  $BC, DC$ 
while  $BC == 0$ 
    zpracuj {
        stav  $\leftarrow$  STAV_MEDIA()
        pokud stav == IDLE
            pak  $BC = BC - 1$ ;
        pokud stav == BUSY
            pak {
                 $DC = DC - 1$ ;
                 $BC = BC - 1$ ;
                pokud  $DC < 0$ 
                    pak BACKOFF( $BPC + 1$ )
            }
    }
ODESLI_RAMEC()
end
```

5.5 Analýza a simulace CSMA/CA algoritmu

Technologie HomePlug je často srovnáván s bezdrátovou technologií IEEE 802.11b. Je to především z toho důvodu, že fyzická vrstva je do jisté míry u obou technologií stejná. Obě technologie pro šíření signálu využívají podobné modulační techniky a mechanismy. Na společně využívaném médiu není možné detekovat kolizi jak je tomu např. u Ethernetu. Kolize na tomto médiu je detekována při nepřijetí potvrzovacího paketu, nebo v případě, že médium je po odeslání paketu zaneprázdněno jinou stanicí.

Obě technologie využívají metodu CSMA/CA proti předcházení kolizím. Princip této metody byl v dostatečné míře probrán v předešlé kapitole.

K porovnání algoritmů byl realizován model diskrétního simulátoru v prostředí Matlab s následující mírou abstrakce:

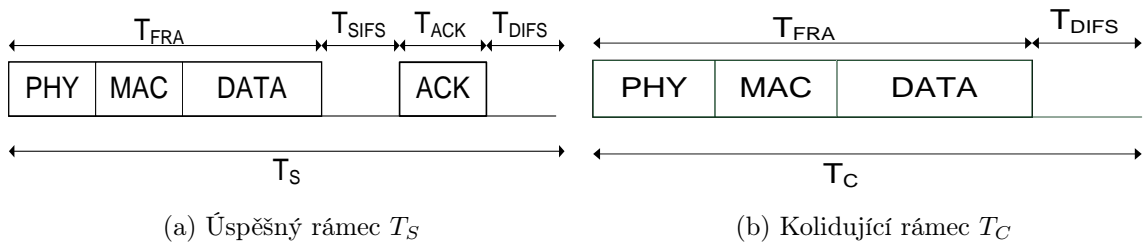
- v síti je n stanic se stejnou prioritou,
- všechny stanice mají v počátku komunikace stejné výchozí podmínky,
- po odeslání rámce má stanice okamžitě ve frontě rámec další,
- detekce kolize je realizována bezprostředně poté, co stanice vygeneruje svůj čas k odeslání,
- přenosový kanál je považován za ideální a fyzická vrstva není aplikována.

5.5.1 Účinnost algoritmu CSMA/CA technologie IEEE 802.11b

Účinnost algoritmu je vyjádřena poměrem úspěšně odeslaných rámců k celkovému počtu rámců podle

$$\eta_{802.11b} = \frac{F_S * T_{FRA}}{F_S * T_S + F_C * T_C + F_I * T_I}, \quad (5.3)$$

kde F_S je celkový počet úspěšně odeslaných rámců, T_{FRA} je čas nutný pro odeslání jednoho rámce, který je daný přenosovou rychlostí technologie a maximální velikostí paketu na MAC vrstvě. T_S je čas nutný pro úspěšné odeslání a zpracování jednoho rámce, F_C je celkový počet kolidujících rámců, T_C je čas nutný pro zjištění kolize, F_I je celkový počet rámců čekající ve frontě a T_I je čas jednoho timeslotu.



Obr. 5.5: Stanovení časových parametrů technologie IEEE 802.11b

Čas doby trvání kolizního stavu a čas, který je nutný pro úspěšné odeslání rámce, je explicitně vyjádřen součtem časových intervalů, které do těchto procedur vstupují [68]

$$T_S = T_{FRA} + T_{ACK} + SIFS + DIFS, \quad (5.4)$$

$$T_C = T_{FRA} + DIFS, \quad (5.5)$$

kde T_{FRA} je doba potřebná pro přenesení jednoho plného rámce o velikosti 1500 B, což při ideální rychlosti udávané standardem IEEE 802b je 11 Mbps trvá cca 165 časových slotů standardu. T_{ACK} je doba potřebná pro doručení potvrzujícího paketu. Tato doba je přibližně rovna třem timeslotům. $SIFS$ je krátká mezirámcová mezera trvající polovinu timeslotu $DIFS$ je dlouhá mezirámcová mezera, která trvá 2.5 timeslotu. Celkové kvantitativní zhodnocení uvádí Tab 5.3. Z důvodu jednoduchosti byly celkové časy aproximovány do timeslotů.

Tab. 5.3: Časové parametry technologie IEEE 802.11b pro analýzu backoff algoritmu.

T_{FRA} [TSlot]	T_{ACK} [TSlot]	$SIFS$ [TSlot]	$DIFS$ [TSlot]	TS [TSlot]	TC [TSlot]	TI [TSlot]	$TSlot$ [μs]
165	3	0.5	2.5	171	164.5	1	20

Algoritmus 5.5.1: WIRELES 801.11B()

```

start
INICIALIZACE_UZLU()
for i ← 1 to pocet_simulaci
    {
        {
            kolize ← KOLIZE()
            pokud kolize > 1
                reinicializace koliznich uzlu
                zapocti kolize
            pokud kolize == 1
                reinicializace upesny uzlu
                dekrementuj ostatni uzly
                zapocti uspesne odeslani
            jinak
                dekrementuj vsechny uzly
                zapocti idle
        } kontrola
    } zpracuj
    vypocti propustnost pro aktualni simulaci
vypocti propustnost
vykresli propustnost
konec

```

5.5.2 Účinnost algoritmu CSMA/CA technologie Homeplug

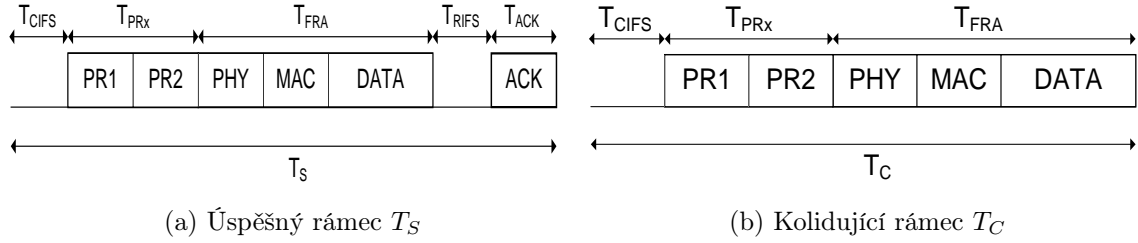
Účinnost algoritmu je vyjádřena poměrem úspěšně odeslaných rámců k celkovému počtu rámců podle

$$\eta_{HP} = \frac{F_S * T_{FRA}}{F_S * T_S + F_C * T_C + F_I * T_I}, \quad (5.6)$$

kde F_S je celkový počet úspěšně odeslaných rámců, T_{FRA} je čas nutný pro odeslání jednoho rámce, který je daný přenosovou rychlostí technologie a maximální

velikostí paketu na MAC vrstvě. T_S je čas nutný pro úspěšné odeslání a zpracování jednoho rámce, F_C je celkový počet kolidujících rámců, T_C je čas nutný pro zjištění kolize, F_I je celkový počet rámců čekající ve frontě a T_I je čas jednoho timeslotu.

Čas doby trvání kolizního stavu a čas, který je nutný pro úspěšné odeslání rámce, je explicitně vyjádřen součtem časových intervalů, které do těchto procedur vstupují [31]



Obr. 5.6: Stanovení časových parametrů technologie HomePlug

$$T_S = CIFS + PR_1 + PR_2 + T_{FRA} + RIFS + T_{ACK}, \quad (5.7)$$

$$T_C = CIFS + PR_1 + PR_2 + T_{FRA}. \quad (5.8)$$

Kde $CIFS$ je hlavní mezirámcová mezera, trvající jeden časový slot, PR_X jsou časové položky pro vyjádření priorit trvající dohromady dva časové sloty. T_{FRA} je doba potřebná pro přenesení jednoho plného rámce o velikosti 1500 B, což při ideální rychlosti udávané standardem 14.1 Mbps trvá cca 40 časových slotů. $RIFS$ je mezirámcová mezera po odeslání rámce a trvá spolu s časovou hodnotou odpovědního rámce T_{ACK} cca 3 časové sloty. Celkové kvantitativní zhodnocení uvádí Tab 5.4. Z důvodu jednoduchosti byly celkové časy aproximovány také do timeslotů.

Tab. 5.4: Časové parametry technologie HomePlug pro numerickou analýzu backoff algoritmu.

T_{FRA} [TSlot]	$PR_{0,1}$ [TSlot]	T_{ACK} [TSlot]	$RIFS$ [TSlot]	$CIFS$ [TSlot]	TS [TSlot]	TC [TSlot]	TI [TSlot]	$TSlot$ [μs]
40	1	2	1	1	46	44	1	35.84

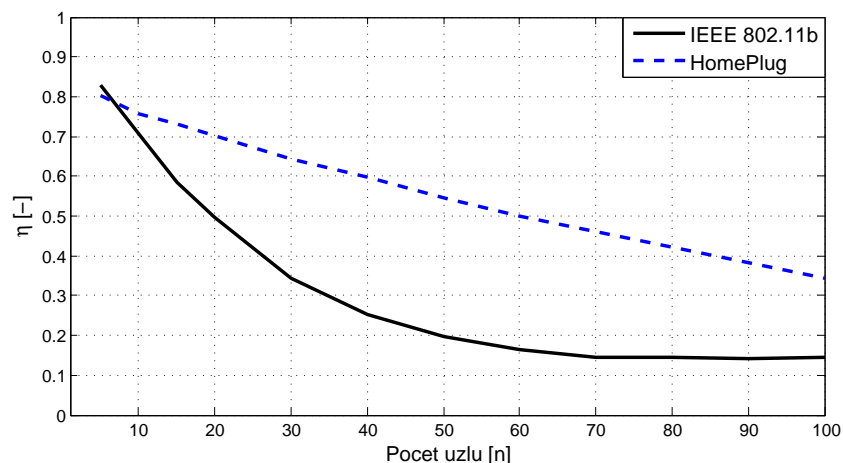
Algoritmus 5.5.2: HOMEPLUG()

```
start
INICIALIZACE_UZLU()
for  $i \leftarrow 1$  to  $pocet\_simulaci$ 
    {
        {
            {
                 $kolize \leftarrow KOLIZE()$ 
                pokud  $kolize > 1$ 
                    {
                        zapocti  $kolize$ 
                        dekrementace  $BC$  a  $DC$ 
                    }
                pak { kontrola  $DC$  parametru
                    {
                        pokud  $DC < 0$ 
                            reinicializace  $BC$  a  $DC$ 
                    }
                pokud  $kolize == 1$ 
                    {
                        zapocti uspesne odeslani
                        reinicializace upesneho uzlu
                    }
                pak { dekrementace  $BC$  a  $DC$  ostatnich uzlu
                    {
                        pokud  $DC < 0$ 
                            reinicializace  $BC$  a  $DC$ 
                    }
                jinak { zapocti idle
                    {
                        dekrementuj vsechny uzly
                    }
            }
        }
        vypocti propustnost pro aktualni simulaci
    }
vypocti propustnost
vykresli propustnost
konec
```

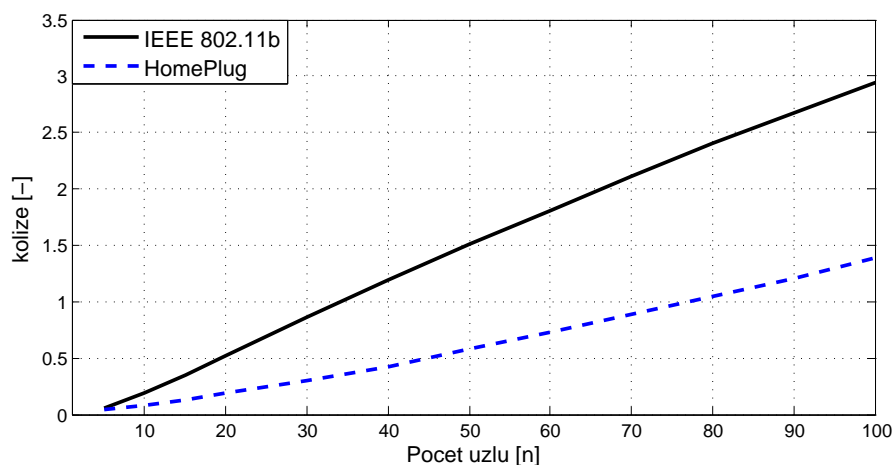
5.5.3 Účinnost CSMA/CA

Podle předpokladu se s počtem stanic propustnost algoritmu snižuje. Toto chování je způsobeno zvyšujícím se počtem kolizí, které se vzrůstajícím počtem uzlů v síti nastávají s vyšší pravděpodobností Obr. 5.8. Je patrné, že lepším výsledků dosahuje technologie HomePlug při využití nižších priorit. Je to způsobeno tím, že stanice, která generuje časový interval pro odeslání, využívá větší okenní interval $CW_{max} = 64$ viz. Tab. 5.2.

Technologie HomePlug obsahuje penalizační čítač DC . Proto je pravděpodobnost kolize, při zvyšujícím se počtu stanic, nižší než u technologie IEEE 802.11b. Ta má, v porovnání s technologií HomePlug, pouze jedno procedurální soutěžní kolo, i když soutěžní okno generuje se zvyšujícími se kolizemi s širšího časového intervalu. Širší



Obr. 5.7: Účinnost MAC algoritmu v HomePlug a IEEE 802.11b.



Obr. 5.8: Průměrný počet kolizních stavů v síti v závislosti na počtu uzlů.

komparativní analýzu porovnání těchto dvou technologií provedli autoři Lin a spol v [68].

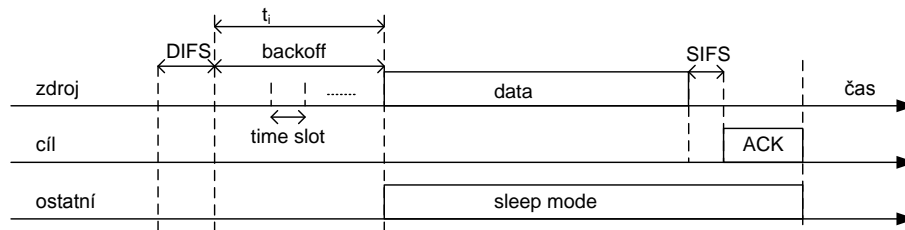
5.6 Analýza velikosti okna CSMA/CA algoritmu

Velikost soutěžícího okna backoff algoritmu je u metody CSMA/CA dynamicky upravována v závislosti na aktuálních podmínkách provozu na společně využívaném médiu. Tímto způsobem se metoda snaží zabránit případné kolizi, kterou je možné zjistit až po úplném odvysílání aktuální datové jednotky. Je pravděpodobné, že s přibývajícím počtem stanic, bude mít tento interval vzrůstající tendenci. Tato kapitola se zaměřuje na strmost tohoto stoupání a porovnává technologii předchá-

zení kolize v HomePlug a IEEE 802.11b.

5.6.1 Analýza velikosti okna algoritmu CSMA/CA technologie IEEE 802.11b

Chování backoff algoritmu zobrazuje Obr. 5.9. Stanice, která má data k vyslání vyčká povinnou mezirámcovou mezeru *DIFS*. V případě, že po ukončení této doby se médium jeví jako nečinné, stanice začne vysílat svá data příjemci. V případě, že stanice po ukončení *DIFS* detekuje médium jako obsazené, vygeneruje si náhodný interval přístupu *BC* z intervalu $BC \in [1, CW_{min}]$, kde $CW_{min} = 31$. Po vygenerování náhodného intervalu *BC* stanice vyčká dobu t_i , která je dána Rov. 5.9.



Obr. 5.9: Backoff procedura v IEEE 802.11b.

Po této době se stanice pokusí znovu o vyslání své zprávy. Po dobu t_i stanice naslouchá médium. V případě, že v této době dojde k novému pokusu o vyslání jinou stanicí, stanice odpočítávání této doby zastaví. Opětovně jej zahájí po ukončení vyslání stanice předchozí.

$$t_i = BC \cdot TS, \quad (5.9)$$

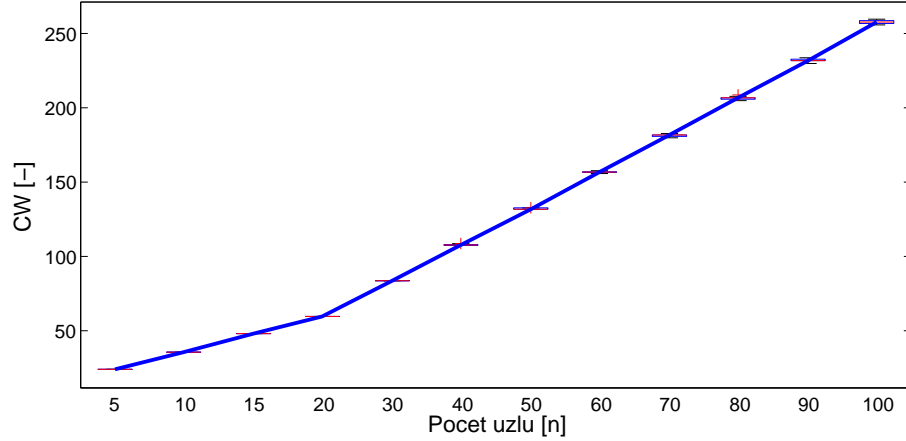
kde *BC* je dáno funkcemi

$$BC = \begin{cases} rand(CW_{min}) & \text{pro } i == 1 \\ min(rand(2^i \cdot CW_{min}), CW_{max}) & \text{pro } i > 1, \end{cases} \quad (5.10)$$

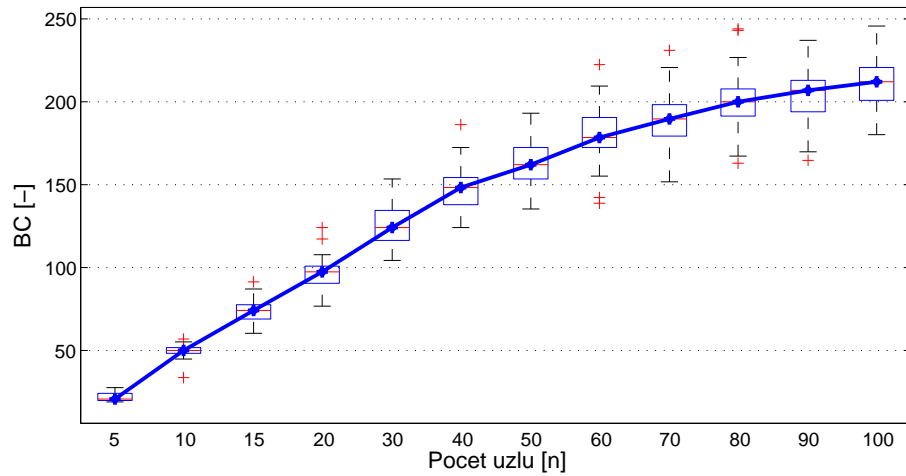
kde i je počet neúspěšných pokusů vyslání, $rand(X)$ je funkce vracející náhodné číslo z intervalu $\langle 1, X \rangle$ s uniformním rozdělením pravděpodobnosti $p_i = \frac{1}{X} \forall i \in \langle 1 \rightarrow X \rangle$. Funkce $min(A, B)$ vrací minimum ze dvou vstupních hodnot. V tomto případě je vstupní hodnotou A výsledek náhodného uniformního rozdělení daný koeficientem dynamického rozšiřování okna podle Rov. 5.11 a hodnotou CW_{max} .

$$A = 2^i \cdot CW_{min}. \quad (5.11)$$

Na Obr. 5.10 je zobrazena analýza soutěžního okna backoff algoritmu v technologii 802.11b. Z obrázku je patrné, že velikost okna s přibývajícím počtem uzlů stoupá. Je to dáno pozvolným zvyšováním velikosti okna.



Obr. 5.10: Průměrná velikost okna backoff algoritmu technologie IEEE 802.11b



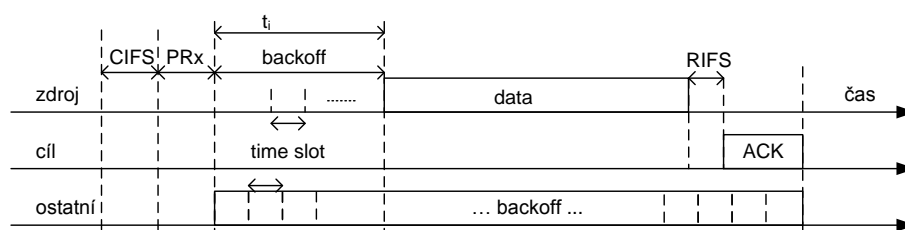
Obr. 5.11: Průměrná velikost BC parametru backoff algoritmu technologie IEEE 802.11b

Pro objektivní porovnání této technologie s jejím upraveným nástupcem HomePlug, byla v analýze velikosti okna zahrnuta i hodnota vysílacích timeslotů. Jedná se o dobu po kterou ostatní uzly vyčkávají v okamžiku, když jeden uzel vysílá. Výsledná průměrná velikost okna je pro zobrazení dána podílem počtu úspěšně odeslaných dat k celkovému počtu timeslotů, které každá stanice musela čekat. Grafické

zobrazení poskytuje zároveň náhled na rozptýl časového okna. Ten se rovněž se zvyšujícím počtem uzlů nepatrně zvyšuje.

5.6.2 Analýza velikosti okna algoritmu CSMA/CA technologie HomePlug

Zjednodušené chování backoff algoritmu v HomePlugu zobrazuje Obr. 5.12. Uzel před vysílání vyčkává mezirámcovou mezeru CIFS. Po této době uzly detekují stav média, ve kterém určují prioritu rámce, který vysílají. V případě, že jejich priorita je stejná nebo vyšší než priorita ostatních stanic, vstupují do backoff algoritmu [52].

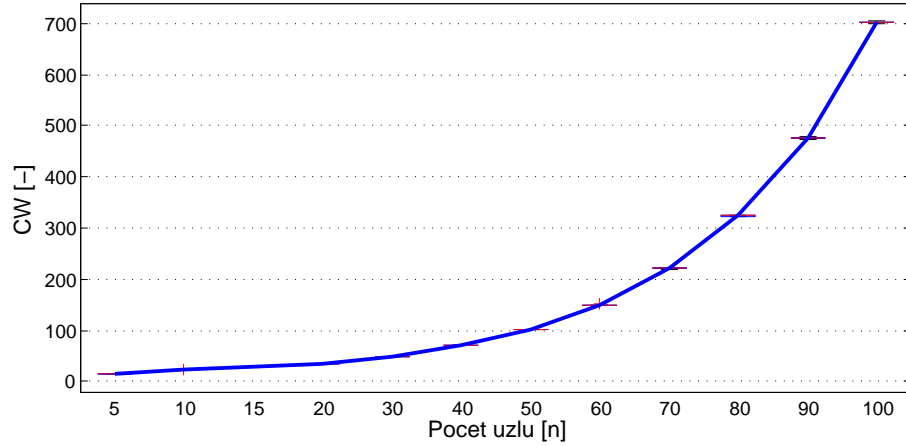


Obr. 5.12: Backoff procedura v HomePlug.

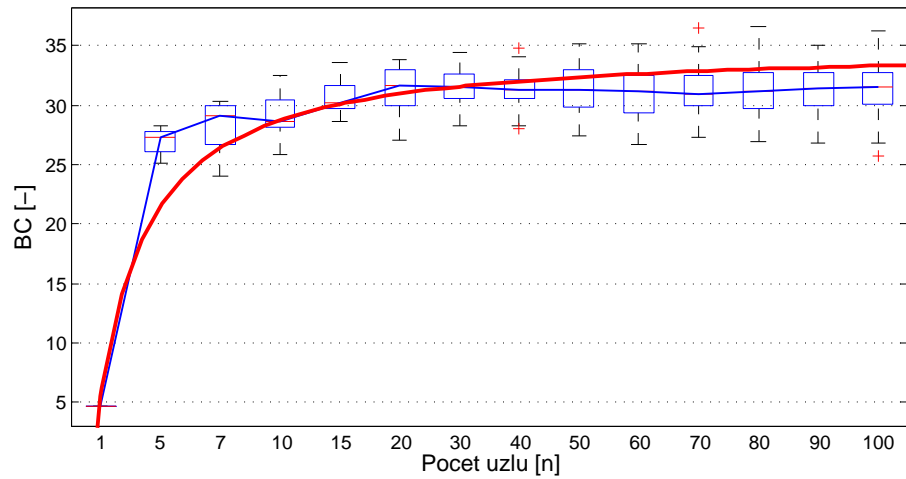
Změnu, kterou technologie HomePlug do backoff algoritmu zavádí je rekurzívní testování média i v době, ve kterém ostatní stanice vysílá. Časový interval t_i backoff algoritmu je rozdělen na n slotů. Při dekrementaci n , stanice detekuje médium a rekurzivně upravuje počet časových slotů, které musí sama vyčkat do zahájení vysílání. V případě, že po dobu detekování média se jeví médium jako nečinné, je dekrementován backoff counter BC , který je definován pro každé soutěžní kolo z Tab. 5.2 v kapitole 5.4. Pro analýzu byla pouze jedna priorita CA2 resp. CA3.

V případě, že se médium jeví jako obsazené, stanice dekrementuje rovněž i penalizační čítač DC , který je také specifikován v Tab. 5.2 pro každé soutěžní kolo. Dosáhne-li procedurální počítadlo maximální hodnoty $BPC = 4$, stanice generuje časové intervaly z intervalu $BC = \langle 0, CW_{max} \rangle$, kde $CW_{max} = 32$ a $DC = 15$. Potom co stanice dosáhne maximálního vyčkávacího času, který je dán těmito limitními hodnotami, pokusí se data odovysílat.

Pro komparativní porovnání s technologií IEEE 802.11b, je v této analýze parametr TC zanedbáván. Ten omezuje maximální počet pokusů na odovysílání $TC_{max} = 15$. Průměrná velikost vysílacího okna je zobrazena Obr. 5.13. Z výsledků je patrné, že kritický počet uzlů je v intervalu 40 – 60. Po této hodnotě má velikost okna exponenciální vzestup, čímž se odlišuje od technologie IEEE 802.11b, která měla tento vzestup téměř lineární.



Obr. 5.13: Průměrná velikost okna backoff algoritmu technologie HomePlug



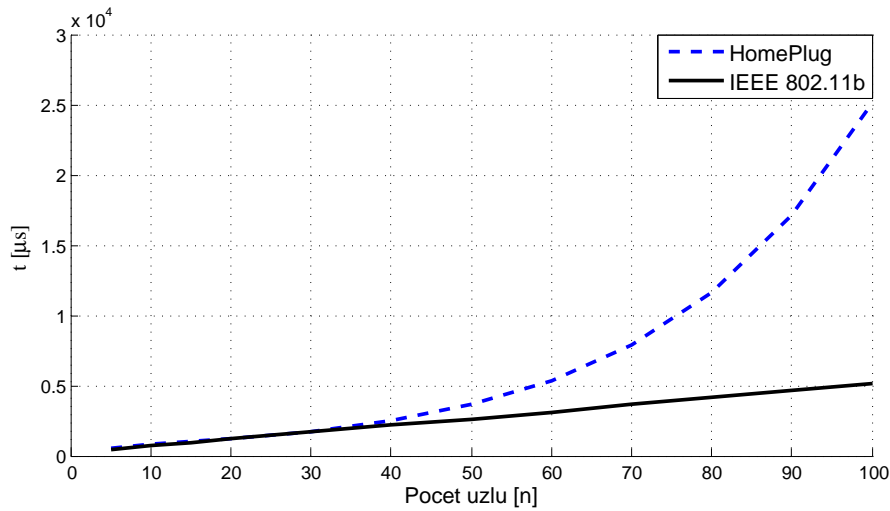
Obr. 5.14: Průměrná velikost BC parametru backoff algoritmu technologie HomePlug

Velikost generovaného okna u technologie HomePlug je rozdělena podle Tab. 5.2. Při analýze nabývá hodnot $BC_{max} = \langle 8, 16, 32, 64 \rangle$ pro $BPC = \langle 1, 2, 3, 4 \rangle$. Pro generování hodnot BC je pak použita funkce $\mathbf{rand}(BC_{max_i})$, jejíž návratovou hodnotou je náhodné číslo z intervalu $k = \langle 1, BC_{max_i} \rangle$ s uniformním rozdělením pravděpodobnosti $p_i = \frac{1}{BC_{max_i}} \forall i \in \langle 1 \rightarrow BC_{max_i} \rangle$. Proto se každý prvek daného intervalu k v ustáleném stavu vyskytne právě se stejnou pravděpodobností. Z Obr. 5.14 je patrné, že již od 15ti uzlů síť dosahuje maximálního okna procedurálního čítače BPC . Síť se tak do saturevaného stavu dostane, díky využití uniformního rozdělení pravděpodobnosti, relativně rychle. Nárůst velikosti okna v závislosti se dal předpokládat. Výsledek však poukazuje na strmost nárůstu tohoto okna. Zatímco u bezdrátové

technologie byl tento nárůst pozvolný, u technologie HomePlug je tento náběh daleko strmější. Z výsledku je patrné, že procedurální kola parametru $BPC = 1$ až 3 se do konečného průběhu zasahují minimálně. Z tohoto důvodu lze uvažovat procedurální aproximační model, pouze s přepínačem $BPC = 4$ tak jak byl představen v [97].

5.6.3 Porovnání velikosti okna CSMA/CA u technologie IEEE 802.11b a HomePlug

Výše uvedené výsledky naznačují, že velikosti okna obou technologií se liší pouze v charakteru jeho narůstání.



Obr. 5.15: Porovnání velikosti okna algoritmu HomePlug a IEEE 802.11b

Obr. 5.15 ukazuje porovnání obou výše uvedených simulací. Pro vyjádření časového okna v μs bylo časové okno u každé technologie převedeno podle

$$t_n = CW_n \cdot TS, \quad (5.12)$$

kde n je počet uzlů v síti a TS je hodnota časového slotu dané technologie. V bezdrátové technologii IEEE 802.11b je tento časový slot podle využití fyzické technologie stanoven na $TS = 20 \mu s$ [21]. V technologii HomePlug je tento slot nastaven na $TS = 35.84 \mu s$ [52]. Je zřejmé, že v reálné síti by ani jedna z technologií podle těchto výsledků neuspěla. Z dostupných zdrojů je však potvrzeno, že saturační analýzy mohou být dostatečným aproximačním modelovým způsobem pro porovnání backoff algoritmů [24, 31].

Obě technologie mají téměř stejný časový průběh. Větší rozdíl nastává při cca 50ti uzlech, kdy se HomePlug začne značně odlišovat od IEEE 802.11b. Z výsledků

plyne, že technologie HomePlug se snaží předcházet kolizím na úkor prodloužení časového limitu, zatímco technologie IEEE 802.11b do sítě vnáší větší rizikovitost kolize Obr. 5.8.

6 OPTIMALIZACE DISTRIBUČNÍ FUNKCE

Jedním z doposud publikovaných výsledků optimalizace přístupové metody technologie HomePlug byla provedena autory Tripathi a spol. v [97]. Výsledkem práce je dvoudimenzionální Markovův model pro analýzu časového okna backoff algoritmu.

Snahou této disertační práce je provést optimalizaci přístupové metody jiným způsobem. Ten bude v následující kapitole představen.

6.1 Úprava vnitřních funkcí backoff algoritmu

Jeden z hlavních nedostatků distribuční funkce v technologii HomePlug je rovnoměrné chování algoritmu při zvyšování zátěže. Simulací a analýzou generování BC parametru bylo zjištěno, že uniformní distribuce do značné míry brání efektivnímu využití přiděleného pásma pro generování hodnot parametru. Pro malý počet uzlů není tak zapotřebí stejná šířka pásma jako pro větší počet uzlů. Tuto metodu se proto snaží tato práce více rozpracovat s využitím jiných distribučních funkcí.

Z grafického zobrazení nárůstu velikosti parametru BC na Obr. 5.14 je patrné, že průměrná velikost tohoto parametru u technologie HomePlug má strmý nárůst funkce k maximálním hodnotám CW_{max} v procedurálním kole $BPC = 4$. Hodnota parametru BC se ustálila na velikosti okna téměř na $\frac{1}{2}CW_{max}$ (v závislosti na použité zaokrouhlovací funkci). To je střední hodnota uniformního rozdělení, které je použito pro generování náhodných hodnot ve funkcích `rand()`.

6.1.1 Optimalizace generátoru náhodných hodnot

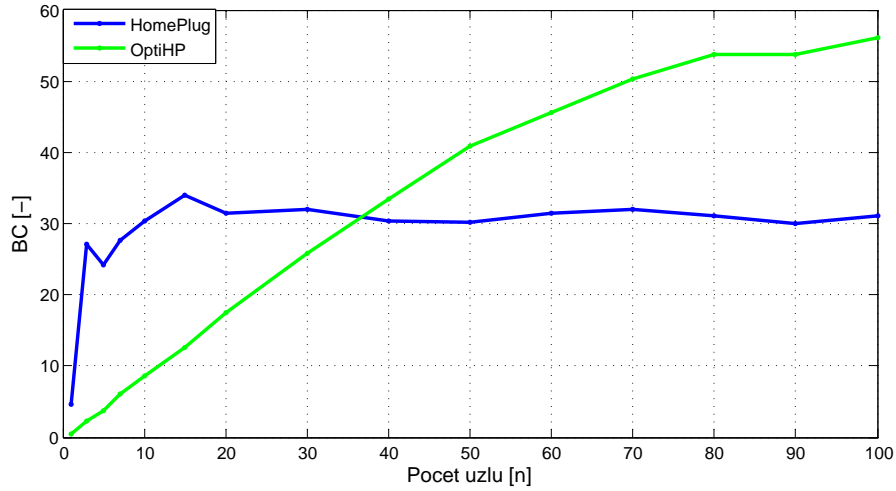
HomePlug využívá pro generování náhodných čísel backoff okna uniformní distribuční rozdělení. Z předchozí analýzy plyne, že síť po ustálení pozvolna saturuje. Při zvyšování zátěže se projeví uniformní rozdělení pozvolným klesáním propustnosti algoritmu. Toto logické chování systému je dáno postupným zaplňováním distribuční funkce. Nedostatek současného algoritmu je rychlý saturační nárůst maximální velikosti okna.

Pro optimalizaci algoritmu byla do přístupové metody vnesena závislost, která se toto chování funkce snaží aproximovat. Optimalizace vychází z předpokladu, že při zvyšujícím se počtu uzlů v síti dochází k saturaci, která se v určitém bodě zastaví (ustálený stav systému).

HomePlug má maximální velikost okna nastaven dle specifikace na $CW_{max} = 64$. Předcházení kolize je zde realizováno nejen náhodnou velikostí časového okna, ale i postupným detekováním linky a úpravou velikosti tohoto okna. Analýza prokázala, že od určité zátěže (7 uzlů, Obr. 5.14) síť dosahuje maximální velikosti intervalu

okna. Toho bylo využito pro realizaci aproximačního modelu. Mírné navyšování okna do maximálního ustáleného stavu parametru BC (do 15ti uzlů) je dáno algoritmem predikce kolize. Od tohoto počtu však systém využívá čtvrtý řád procedurálních čítačů (viz. Tab. 5.2.

Pro rovnoměrnější ustálení generování BC parametru, byla využita Weibullova distribuce. Rozptyl generování byl nastaven na median současného algoritmu. Ten se s počtem uzlů zvětšoval a posouval k maximální hodnotě okna. Tímto zůstaly základní parametry přístupové metody nezměněny. Obr. 6.1 ukazuje postupné zvyšování BC parametru.



Obr. 6.1: Rovnoměrná distribuce BC parametru.

6.2 Výsledky optimalizovaných metod

Následující kapitola shrnuje výsledky optimalizované metody. Výsledky naznačují, že závislost zatížení sítě na generování parametrů přístupové metody je jedna z možností jak také předcházet snížené propustností. Využíváním adaptivních algoritmů je síti umožněno se dynamičtěji přizpůsobovat. Dílčí výsledky těchto výzkumů byly publikovány v [13]. Testování probíhalo numerickou analýzou. Komplexní přehled většiny dílčích výsledků lze vidět v příloze A, B a C.

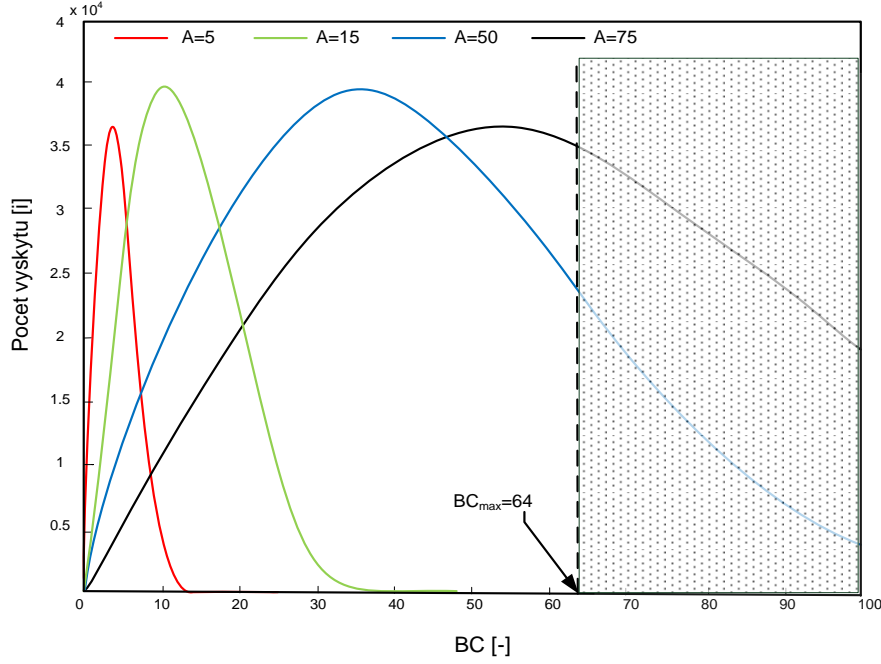
Pro následující výsledky jsou využity tyto parametry distribučních funkcí:

- Weibullova distribuce:

$$BC_i = \min(\text{fix}(\text{wblrnd}(\text{NumNodes}, \text{DType})), 64) \quad (6.1)$$

kde BC_i je parametr okna, $\min()$ je funkce vracející minimum ze dvou vstupních parametrů, kde první z nich je zaokrouhlené číslo funkcí $\text{fix}()$, které

je vygenerované z Weibullové distribuce a druhým je parametr okna. Parametr šikmosti v tomto případě odpovídal zatížením sítě, které je v saturačním modelu reprezentováno počtem uzlů a parametrem šířky, byl parametr $DType \in \langle 1, 15 \rangle$, který určoval iterační krok analýzy. Parametr šikmosti by tak měl především odrážet reálné podmínky daného modelu. Hodnoty intervalu $DType$ jsou celá čísla.



Obr. 6.2: Weibullová distribuce s parametrem $B=2$.

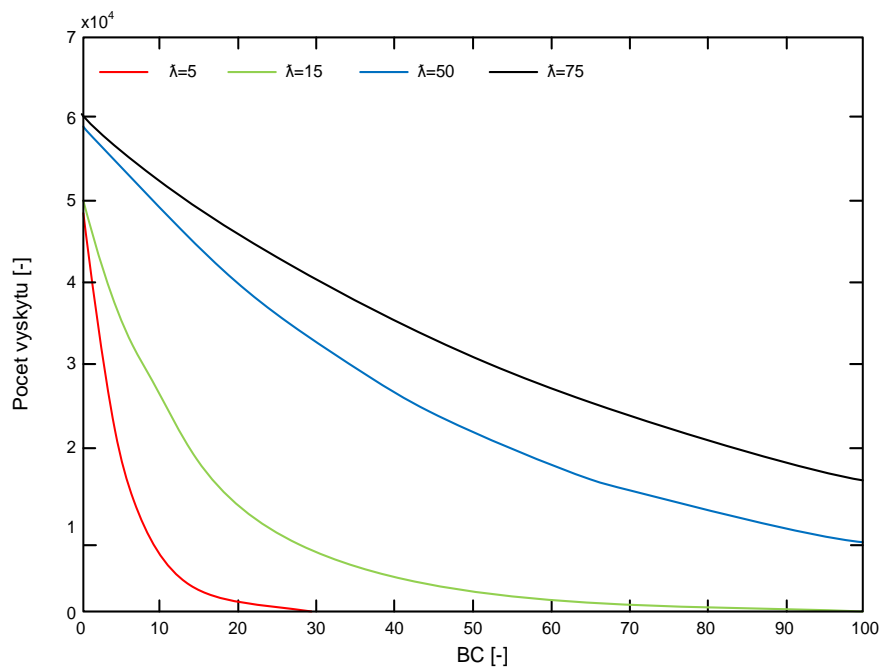
- Exponenciální distribuce:

$$BC_i = \min(\text{fix}(\text{exprnd}(\text{NumNodes}/DType)), 100) \quad (6.2)$$

kde BC_i je parametr okna, $\min()$ je funkce vracející minimum ze dvou vstupních parametrů, kde první z nich je zaokrouhlené číslo funkcí $\text{fix}()$, které je vygenerované z exponenciální distribuce a druhým je parametr okna. Parametrem středního rozdělení λ v exponenciální distribuci byl podíl zatížení sítě a hodnoty $DType \in \langle 1, 15 \rangle$, která určovala iterační krok analýzy. Hodnoty intervalu $DType$ jsou celá čísla.

- Beta distribuce:

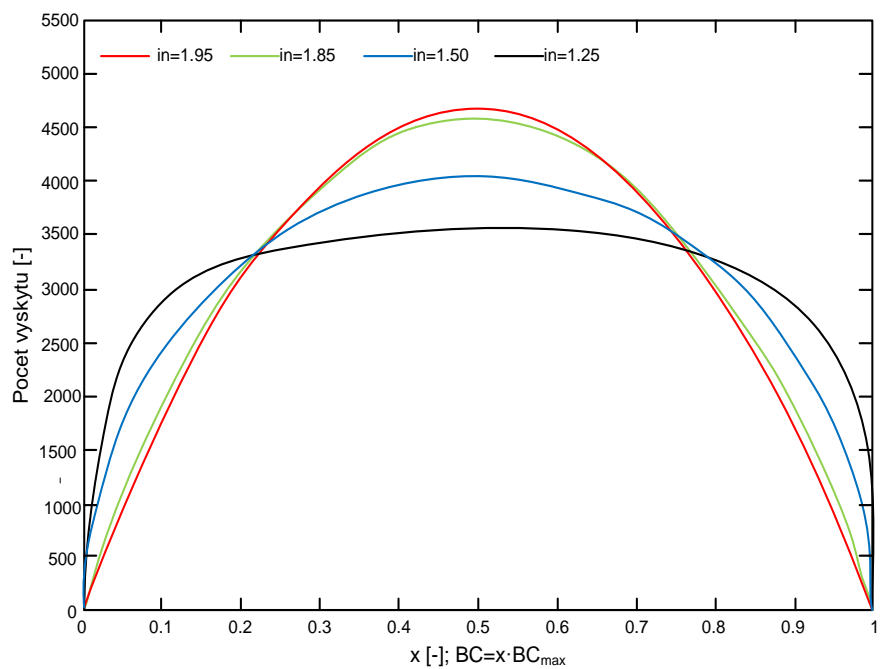
$$\text{index} = (DType + 1) - ((DType/100) * \text{NumNodes}) \quad (6.3)$$



Obr. 6.3: Průběh testovaných exponenciálních distribucí.

$$BC_i = \text{fix}((\text{betarnd}(\text{index}, \text{index})) * 64) \quad (6.4)$$

kde BC_i je parametr okna, $\min()$ je funkce vracející minimum ze dvou vstupních



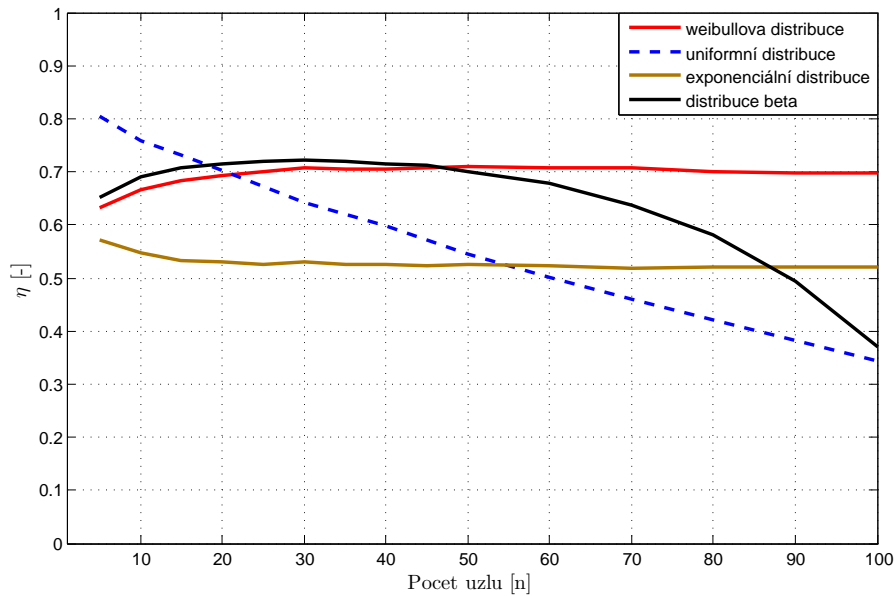
Obr. 6.4: Průběh testovaných beta distribucí.

parametrů, kde první z nich je zaokrouhlené číslo funkcí `fix()`, které je vygenerované z distribuce Beta vynásobeným velikostí okna, protože distribuce Beta vrací náhodně vygenerovaná čísla z intervalu $k \in \langle 0, 1 \rangle \forall \mathbf{R}^+$. Parametry distribuce beta *index* byly dvě stejné hodnoty z intervalu $l \in \langle 1, DType_{max} \rangle$, kde $DType_{max}$ byl pro zachování stejných podmínek nastaven na 15.

Jednotlivá rozdělení jsou pružná, a proto bylo nutné zvolit odpovídající parametry. Volby hodnot parametrů jednotlivých funkcí nebyly voleny náhodně. Parametry byly zvoleny tak, aby průběh distribuční funkce odpovídal standardnímu průběhu dané funkce a netvořil tak např. uniformní rozdělení. Je samozřejmé, že mohou být optimalizovány ještě podrobněji, výsledky se však rapidně neměnily.

6.2.1 Propustnost algoritmu

Předmětem výzkumu bylo zvýšení propustnosti algoritmu v závislosti na použití jiných distribučních algoritmů. Uniformní rozdělení, které je ve většině technologií využito, by se mělo chovat podle předpokladů nejspravedlivěji. Dílčí výsledky však ukazují, že v případě nelinearity systému tomu tak není. Rovněž se ukázalo,



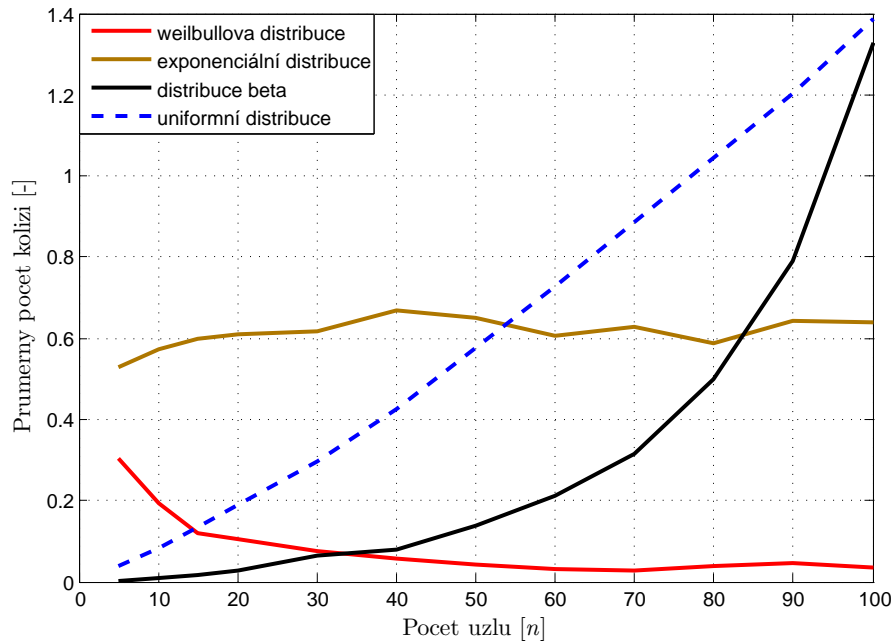
Obr. 6.5: Optimalizace propustnosti algoritmu v HomePlug.

že zvýšení propustnosti neznamena vždy zlepšení chování systému. Některé ideální výsledky byly způsobeny dlouhou čekací dobou okna. To znamená, že sice bylo v systému méně kolizních stavů, avšak uzly měly mnohem větší interval, z kterého generovaly své *BC* parametry.

Výsledky potvrzují, že zlepšené chování algoritmu HomePlug se projevuje po dosažení hranice cca 20ti uzlů. Před tímto hraničním bodem dosahuje uniformní distribuce lepších výsledků.

6.2.2 Průměrný počet kolizí

Předmětem této kapitoly bylo sledování počtu kolizí, které systému značně snižují propustnost. Zde se některé distribuce projeví značně překvapivě. Aby bylo porovnání objektivní, podmínky distribučních funkcí zůstaly nezměněny.

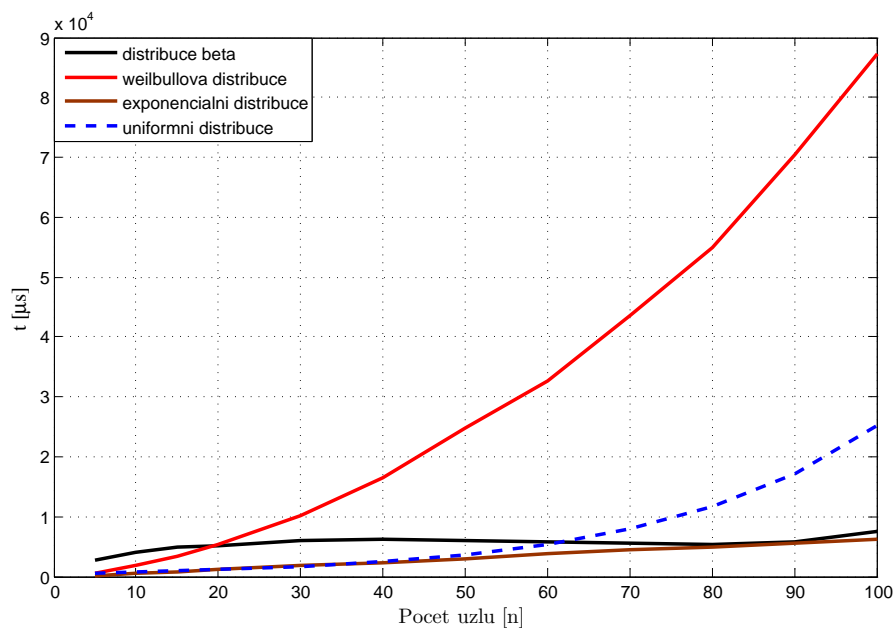


Obr. 6.6: Optimalizace kolizí algoritmu v HomePlug.

Z dílčích výsledků nejnižšího počtu kolizí dosahovala Weibulova distribuce. U této distribuce se dokonce počet kolizních stavů snižoval. Bylo to dáno podmínkami, které byly této distribuci dány. Pro nízký počet uzlů v systému byla distribuční funkce relativně úzká. S vyšším počtem uzlů se toto pole rozšiřovalo a tím se snižovala i pravděpodobnost dvou stejně vygenerovaných parametrů BC .

6.2.3 Průměrná velikost doby čekání

Celková průměrná velikost doby čekání na uzel je jedním z objektivních parametrů jak porovnat backoff algoritmus. Výsledky ukazují, že nejdelších časů dosahovala Weibulova distribuce. Tím se do značné míry objasňuje ideální propustnost, se kterou bylo v analýze dosaženo.



Obr. 6.7: Optimalizace průměrné doby čekání algoritmu v HomePlug.

6.3 Zhodnocení dosažených výsledků

S ohledem na kapitolu o vnitřních funkcích backoff algoritmu byl proveden výzkum těchto funkcí a jejich vliv na technologii HomePlug [13]. Podrobná simulační analýza prokázala, že procedura ochrany proti kolizím s využitím uniformní distribuce je sice dostatečná pro nízký počet uzlů, ale ztrácí již při větším počtu uzlů.

Z výsledků je patrné, že zaokrouhlovací funkce i distribuční algoritmy výrazně ovlivňují chování backoff algoritmu. V normě technologie HomePlug se však o těchto funkcích nijak nehovoří.

Hlavní výhoda optimalizace spočívá v odstranění zmiňovaného nedostatku. Analýza těchto algoritmů je časově náročná, proto je možné, že optimalizace má ještě své nenalezené rezervy. Průběžné výsledky jsou uvedeny v příloze této práce.

7 MODELOVÁNÍ PŘÍSTUPOVÉ VRSTVY

Za účelem bližší analýzy a optimalizace backoff algoritmu, je zapotřebí přístupovou vrstvu simulovat - namodelovat. K analýze vrstvy je možné přistoupit různými způsoby.

Budou představeny dva Markovovy modely, které byly pro technologii HomePlug publikovány. Oba modely vycházejí z analýzy distribuční funkce v IEEE 802.11b, kterou jako první publikoval Bianchi v [24]. Oba modely jsou numericky ověřeny.

V následujících kapitolách se práce zaměřuje na hlubší analýzu HomePlugu a porovnává jej s bezdrátovou technologií. Je představena analýza plovoucího okna obou technologií a analýza základního parametru backoff počítačů, parametr BC . V neposlední řadě je porovnán optimalizovaný backoff algoritmus HomePlug. Všechny analýzy jsou provedeny v saturačních podmínkách bez aproximace s mírou abstrakce, která je definována. Saturační podmínky mohou být vhodnou alternativou na náhled algoritmů.

Pro analýzu sítě v saturačních podmínkách, je zapotřebí stanovit základní míru abstrakce modelu:

- v síti existuje n uzlů připravených k vysílání rámce,
- všechny stanice vysílají data se stejnou prioritou,
- každá stanice obdrží rámec okamžitě po odvysílání rámce,
- kolizní stav je detekován v případě, že v daný moment mají některé stanice stejnou hodnotu čítače BC , jejíž započítání bylo ve stejný okamžik.

7.1 Simulační model

Jedním ze způsobů ověření je simulační analýza, která abstrahuje reálné podmínky, které do modelu vstupují. Tyto podmínky jsou pomocí matematických funkcí nahrazeny. Tento způsob analýzy je založen na využití jednoho ze simulačních nástrojů. Mezi nejznámější patří Opnet Modeler [78] nebo Network Simulator 2 [35]. Žádný z těchto nejrozšířenějších nástrojů však neobsahuje knihovny pro technologii PLC.

7.2 Analytický model

Další ze způsobů je analytický model sítě. Jedním ze způsobů analytického vyjádření chování sítě jsou Markovovy modely, které např. matematicky popisují chování jednotlivých uzlů sítě s definovanou mírou abstrakce. Jsou představeny dva modely, které byly publikovány. Tyto modely abstrahují nepotřebné vrstvy vstupující do jednoho problému a zaměřují se na konkrétní část. Problémem u těchto modelů je

nelineární systém, který vzniká vícevrstevným modelováním a který je obtížné výpočetně vyřešit. K získání pravděpodobností, které do systému vstupují, je nutné vícevrstvé násobení maticového zápisu. To u technologie HomePlug mnohdy převyšuje paměťové nároky výpočetního systému.

Nechť je dán systém definovaný N stavy. Chování systému lze pak popsat maticí pravděpodobnosti s n kroky, které vyjadřují pravděpodobnost přechodu ze stavu n_i na stav n_{i+1} , $\mathbf{P}(n) = p_{i|j}$ pro $n \in \langle 0, N \rangle$. Pak podmíněná pravděpodobnost $p_{i|j}$ je pravděpodobnost přechodu mezi dvěma stavy i, j .

Jedna z možných reprezentací zápisu těchto stavů je grafická reprezentace modelu, jak je uvedeno např. na Obr. 7.1. Druhý, méně používaný zápis vzhledem k jeho rozsáhlosti, je maticový zápis pravděpodobnosti \mathbf{P} .

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,1} & \cdots & p_{1,N} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{N,1} & p_{N,2} & \cdots & p_{N,N} \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

Pro všechny tyto stavy platí:

$$\sum_{j=1}^N p_{i,j} = 1 \quad \forall i, j. \quad (7.2)$$

V následujících kapitolách jsou představeny dva základní modely, které byly pro oblast HomePlug publikovány. Dále je představen aproximační model, který oba modely do značné míry zjednodušuje. Všechny tři modely jsou numerickou analýzou ověřeny. Práce ukazuje, že aproximační model podává rovněž dobré výsledky. Další analýzy pak budou prováděny s danou mírou abstrakce pro všechny tři modely.

7.2.1 Dvoudimenzionální model HomePlug

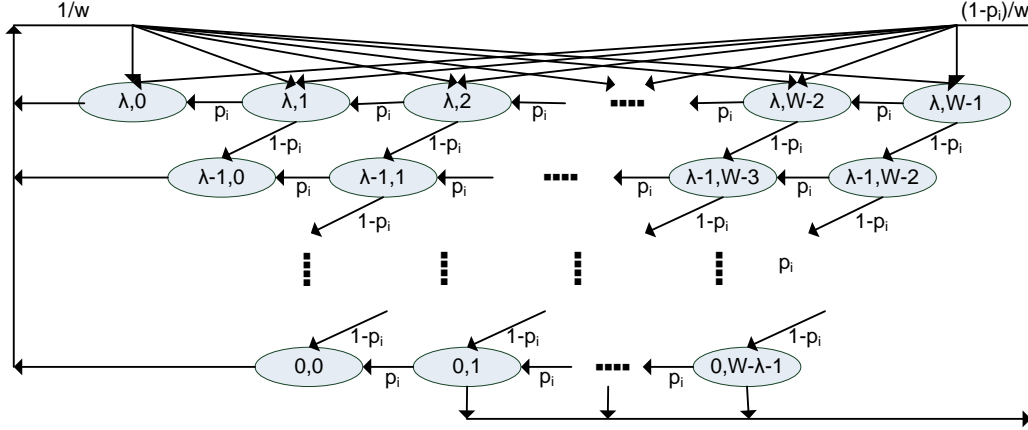
Ve způsobu představeném v [37] je využit dvourozměrný Markovův model, který bere v úvahu především hodnoty časovačů DC a BC . Toto zjednodušení je nezávislé na hodnotě procedurálního čítače BPC , který je inkrementován v případě obsazeného média, kdy hodnota penalizačního čítače $DC < 0$. Na základě těchto předpokladů je systém modelován jako 2D Markovův model, který je zobrazen na Obr. 7.1.

Ustálená pravděpodobnost pro systém je vyjádřena autory jako

$$P(\beta, CW - \lambda - DC_\beta) = (1 - p_i) \sum_{BC_\beta=1}^{\beta+DC_\beta} p_i^{BC_\beta-1} P(\beta + 1, CW - \lambda - DC_\beta + BC_\beta)$$

pro

$$DC_\beta = 1 - \beta, 2 - \beta, \dots, CW - \lambda, \text{ a } \beta = 0, 1, \dots, \lambda - 1 \quad (7.3)$$



Obr. 7.1: Dvoudimenzionální Markovův model technologie HomePlug [37].

$$P(\lambda, CW - \lambda - DC_\lambda) = P(\lambda, CW - 1) \sum_{BC_\lambda=0}^{\lambda+DC_\lambda-1} p_i^{BC_\lambda}$$

pro

$$DC_\lambda = 1 - \lambda, 2 - \lambda, \dots, CW - \lambda \quad (7.4)$$

Ustálená pravděpodobnost $p(0)$, že daný uzel vyšle svůj rámec v kterémkoli časovém slotu, je pak definována jako

$$p_0 = \sum_{i=0}^{\lambda} \prod (i, 0) \quad (7.5)$$

Definováním pravděpodobnosti $p(i)$ pro jakékoli hodnoty čítačů DC a BC při úvaze Rov. 7.5 je definována jako

$$p_i = (1 - p_0)^{n-1} \quad (7.6)$$

kde n je počet uzlů v síti. Na základě výše uvedených podmínek mohou být definovány pravděpodobnosti pro ostatní součásti systému jako:

$$\begin{aligned} P_S &= np_0 (1 - p_0)^{n-1} \\ P_I &= (1 - p_0)^n \\ P_C &= 1 - P_S - P_I, \end{aligned} \quad (7.7)$$

Kde P_s je pravděpodobnost, že stanice úspěšně odešle rámec, P_I je pravděpodobnost, že stanice se bude nacházet v IDLE módu, a P_C je vyjádření pravděpodobnosti kolizního stavu, který je opačným jevem jevů ostatních.

7.2.2 Třídímenzionální model HomePlug

Druhou analytickou metodou publikovanou pro MAC vrstvu technologie HomePlug je tří-dímenzionální Markovův model autorů Jung a spol. [65]. Na rozdíl od dvoudímenzionálního modelu autoři zavádí do modelu i hodnotu proměnné BPC, která určuje de facto dobu obsazenosti média. Složitost modelu tak značně narůstá. Grafické znázornění je obdobné jako u dvoudímenzionálního modelu s tím, že jsou doplněny ještě další vrstvy čítače *BPC*.

Tímto způsobem by mělo být dosaženo přesnějších výsledků. Simulace však potvrzuje, že výsledky se téměř shodují. Pravděpodobnost $P_{i,j,k}$ kde i představuje procedurální počítadlo *BPC*, j reprezentuje penalizační čítač *DC* a k vyjadřuje hodnotu časovače *BC*, je autory definována jako

$$P_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{(1-p)}{W_0+1} \sum_{h=1}^m \sum_{g=0}^{M_{h-1}} P_{h,g,0}, \\ \text{pro } i = 1, j = M_0, \text{ a } k = W_0 \\ \\ \frac{p_b}{W_{i-1}+1} \sum_{h=1}^{W_{i-2}} P_{i-1,0,h} + \frac{p}{W_{i-1}+1} \sum_{g=0}^{M_{i-2}} P_{i-1,g,0}, \\ \text{pro } 1 < i < m, j = M_{i-1}, \text{ a } k = W_{i-1} \\ \\ \frac{p_b}{W_{m-1}+1} \left\{ \sum_{h=1}^{W_{m-2}} P_{m-1,0,h} + \sum_{g=1}^{W_{m-1}} P_{m,0,g} \right\} \\ + \frac{p}{W_{m-1}+1} \left\{ \sum_{l=0}^{W_{m-2}} P_{m-2,l,0} + \sum_{g=0}^{M_{m-1}} P_{m,g,0} \right\}, \\ \text{pro } i = m, j = M_{m-1}, \text{ a } k = W_{m-1} \\ \\ \sum_{g=0}^{W_{i-1}-k} (1-p_b)^g P_{i,M_{i-1},W_{i-1}}, \\ \text{pro } 1 \leq i \leq m, j = M_{i-1}, k < W_{i-1} \\ \\ p_b^{M_{i-1}-j} P_{i,M_{i-1},W_{i-1}}, \\ \text{pro } 1 \leq i \leq m, j \neq M_{i-1}, k = W_{i-1} - M_{i-1} + j \\ \\ p_b^{M_{i-1}-j} \sum_{g=0}^{W_{i-1}-k-M_{i-1}+j} \frac{(g+1) \cdots (g+M_{i-1}-j)}{(M_{i-1}-j)!} \\ x (1-p_b)^g P_{i,M_{i-1},W_{i-1}}, \\ \text{pro } 1 \leq i \leq m, j \neq M_{i-1}, k < W_{i-1} - M_{i-1} + j \end{cases} \quad (7.8)$$

Kde W_{i-1} a M_{i-1} značí velikost hodnoty *BC* a *DC*. P_b označuje pravděpodobnost, že medium se nachází v zaneprázdněném stavu.

$$p_b = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (7.9)$$

Pravděpodobnost úspěšně přeneseného rámce p_s je definována jako

$$p_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} \quad (7.10)$$

kde P_{tr} je pravděpodobnost, že alespoň jedna stanice vyšle rámeček a τ je definováno jako součet všech pravděpodobností, při podmínce $BC = 0$

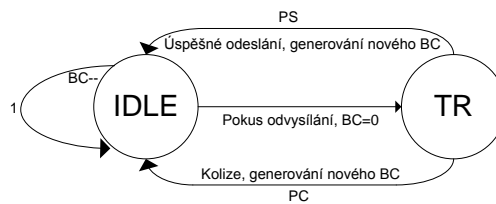
$$\tau = \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{M_{i-1}} P_{i,j,0} \quad (7.11)$$

7.3 Aproximační model technologie HomePlug

S ohledem na dvoudimenzionální model lze předpokládat, že HomePlug relativně rychle dosáhne nejvyššího stupně procedurálního počítadla. Za tohoto předpokladu je možné aproximovat předešlé tři procedurální počítadla obdobným způsobem jako to provedli autoři v [37].

Vzhledem k tomu, že počítadlo obsazenosti kanálu (DC) může nabývat maximální hodnoty podle Tab. 5.2 ($DC_{max} = 15$) lze i tento parametr aproximovat. V tomto případě je obdrženo aproximační model, který je omezen pouze maximální velikostí okna BC_{max} . V tomto případě do modelu vstupuje hlavní proměnná $BC_{max} = 64$ [14].

Modelový případ lze schématicky zobrazit obdobným způsobem jako je dvoudimenzionální model 7.1 s tím, že počítadlo DC je zanedbáno. S ohledem na míru abstrakce a aproximační parametry, je tento systém možné modelovat systémem jako jednoduchý Markovův řetězec. Grafiky zjednodušené zobrazení stavu jedné stanice je uvedeno na Obr. 7.2.



Obr. 7.2: Aproximační model technologie HomePlug.

Realizovaný numerický model je z procesního hlediska řízen událostmi. Události v síti byly rozděleny na režim *IDLE*, režim vysílání *TR* a *KOLIZE* podle definice na Obr. 7.2. Kolize je na grafickém zobrazení realizována přechodovou šipkou zpět do režimu *IDLE*. Potom co je v systému ustanoven požadovaný počet stanic $n \in \langle 0, 100 \rangle$, je proces řízen hlavní událostí - *detekcí kolize*. Při detekci kolize dochází

k zaznamenání kolizního stavu a kolidujícím stanicím jsou vygenerovány nové ustanovující podmínky, při kterých do systému vstupuje. V každé iteraci realizovaného modelu je v systému zaznamenán rovněž stav *IDLE* režimu, při kterém jsou všechny stanice v klidovém stavu. Dalším ze stavů, kdy jsou v systému měněny podmínky je stav *TR* - vysílání. Při tomto stavu je stanici, které se tento stav týká, obnoveno počítadlo, dle patřičného přístupu. Podrobnější informace o zvoleném postupu je uvedeno v kapitole analýzy účinnosti algoritmu.

7.3.1 Odvození pravděpodobnosti kolize

Nechť je v systému dáno n uzlů. Každý z nich si zvolí svůj parametr vysílání jako jednotku času t_n se stejnou uniformní pravděpodobností

$$p_n = \frac{1}{BC_{max}} \quad (7.12)$$

Z pohledu modelu dojde vždy k dekrementaci čítače okna. Proto pravděpodobnost, že stav tohoto počítadla bude dekrementován je v tomto modelu rovno jedné. Jestliže stav počítadla bude rovna nule, dojde k pokusu o odvysílání rámce. Tento pokus je roven jedné, neboť kolize se v systému identifikuje v době, kdy dojde k pokusu o odeslání. Pravděpodobnost, že stanice při dosažení $BC = 0$ se nepokusí rámec odvysílat je mírou abstrakce zanedbána. Jedná se o poruchové stavy, které jsou v modelovém případě zanedbány.

Pravděpodobnosti kolize dvou stanic

Pravděpodobnost, že si dvě stanice zvolí v inicializačním procesu stejnou velikost parametru BC může být je dána uniformním rozložením podle Rov. 7.12. Předpokládejme reálný parametr $BC_{max} = 64$. Pravděpodobnost, že dvě stanice si z intervalu $CW_i = \langle 0, BC_{max} \rangle$ zvolí v aproximačním modelu právě stejnou hodnotu parametru p_c (tedy $CW_1 = CW_2$) je dána

$$p_c = \frac{BC_{max}}{BC_{max} \cdot BC_{max}} \quad (7.13)$$

kde pravděpodobnost úspěšného odeslání je dána situací, kdy si obě stanice vygenerují právě různé hodnoty parametru okna CW . To je dáno vztahem

$$p_s = \frac{BC_{max} \cdot (BC_{max} - 1)}{BC_{max} \cdot BC_{max}}. \quad (7.14)$$

Pravděpodobnost, že systém v dané iteraci bude v idle režimu je dáno stavem, kdy okno stanic je větší jako 0 ($CW_i > 0$). To je pak dáno

$$p_c = 1 - \frac{BC_{max} \cdot (BC_{max} - 1)}{BC_{max} \cdot BC_{max}} - \left(\frac{BC_{max} - 1}{BC_{max}} \right)^2 \quad (7.15)$$

Pravděpodobnosti kolize v systému s n stanicemi

Na základě předchozích předpokladů a definované míry abstrakce, je možné definovat pravděpodobnost kolize v systému s předem definovaným počtem n stanic stejně jako Rov. 7.13. Pravděpodobnost kolize je tedy jev opačný k pravděpodobnosti úspěšného odeslání

$$p_c = 1 - p_s \quad (7.16)$$

kde

$$p_s = \frac{BC_{max} \cdot (BC_{max} - 1) \cdot (BC_{max} - 2) \cdots (BC_{max} - n + 1)}{BC_{max}^n} \quad (7.17)$$

pro $n \leq BC_{max}$,

pak

$$p_c = 1 - \frac{BC_{max} \cdot (BC_{max} - 1) \cdot (BC_{max} - 2) \cdots (BC_{max} - n + 1)}{BC_{max}^n}. \quad (7.18)$$

Zobecněním výše uvedených rovnic je možné definovat pravděpodobnost kolize v systému v jedné iteraci jako

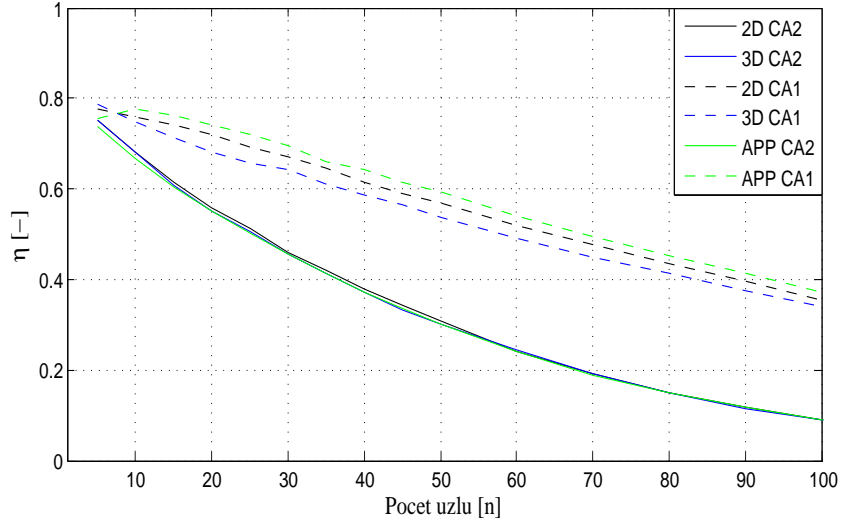
$$p_c = \begin{cases} 1 - \frac{BC_{max}!}{(BC_{max}-n+1)! BC_{max}^n} & \text{pro } n \leq BC_{max} \\ 1 & \text{pro } n > BC_{max} \end{cases} \quad (7.19)$$

7.3.2 Stanovení aproximačního modelu

Stanovením předcházejících kolizních pravděpodobností je systém kalkulován na základě aktuálních podmínek. Můžeme tak stanovit s jakou pravděpodobností za daných podmínek v systému stanice odvysílá svůj paket. Není zde zahrnuta rekurze systému, proto je tento model značně jednodušší a výpočetně méně náročný než předcházející modely.

Pro stanovení okna systému byl použit maximální časový interval systému HomePlug $BC_{max}=64$. Ve stanoveném modelu systému byla aproximována procedura detekce média v průběhu časového okna. K tomu bylo přistoupeno na základě numerické simulace systému HomePlug Obr. 7.3. Ověřením 2D, 3D a zamýšlenou aproximací bylo zjištěno, že tato procedura na propustnost sítě nemá znamenitý vliv.

Pro ověření modelů, byl realizován 2D, 3D a aproximační diskretní simulátor, který všechny tři zmiňované přístupy porovnává. V realizaci 3D modelu proto vstupovaly do backoff algoritmu všechny parametry HomePlug. Ve 2D modelu byl parametr $BPC = 4$. Proto do simulace vstupovala pouze poslední dvojice parametru DC



Obr. 7.3: Porovnání jednotlivých modelových přístupů.

a BC . V aproximačním modelu byl využit pouze parametr BC a jeho maximální možná hodnota dle specifikace $BC = 64$.

Všechny tři modely se po dostatečném počtu iterací dostaly do ustáleného stavu, při kterém vykazovaly rovnocenné průběhy. Při analýze striktnějšího prioritního režimu je tento rozestup dokonce méně výraznější než je tomu při benevolentnější prioritě. Na základě průběhů je možné konstatovat, že tyto mírné rozestupy mezi získanými průběhy lze pro podrobnější analýzu systému zanedbat.

Pro stanovení modelu byla vybrána metoda rekurzního dopočtu pravděpodobností kolize. Analytický model rekurzivně stanoví množství volného pásma sítě s předem stanovenými podmínkami. Za tímto účelem bylo zapotřebí stanovit pravděpodobnosti výskytu kolize n -tic v n uzlovém systému.

Definice pravděpodobností pro $n=5$

Hodnoty parametrů uzlů jsou generovány z náhodného intervalu $x_i = \langle 0, 63 \rangle$ pomocí uniformního rozložení. Pravděpodobnost, že si právě dva uzly z n uzlů vygenerují stejné hodnoty parametrů lze stanovit podobným způsobem jako v rovnici 7.19. Možností, které však mohou nastat, je více. Dále je uvedeno odvození pravděpodobnostních matic pro pět uzlů. V příloze D jsou pak uvedeny pravděpodobnosti pro prvních pět uzlů.

Pro stanovení pravděpodobností bude použita následující konvence. Uzly, které budou mít vygenerovanou hodnotu stejného BC budou označeny NC_i , kde i je počet kolidujících dvojic resp. trojic. Počet uzlů, které budou mít vygenerovanou hodnotu odlišného BC a nebudou v kolizi s žádným jiným, bude označen NS . Proto pravděpodobnost p_i , že padnou následující možnosti, je:

- $NC_1 = 5$ a $NS = 0$:

$$p_1 = \frac{BC_{max}}{BC_{max}^n}, \quad (7.20)$$

- $NC_1 = 4$ a $NS = 1$:

$$p_2 = \binom{n}{NS} \cdot \frac{BC_{max} \cdot BC_{max-1}}{BC_{max}^n}, \quad (7.21)$$

- $NC_1 = 3$ a $NS = 2$:

$$p_3 = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{NS} BC_{max-i}}{BC_{max}^n}, \quad (7.22)$$

- $NC_1 = 3, NC_2 = 2$ a $NS = 0$:

$$p_4 = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{BC_{max} \cdot BC_{max-1}}{BC_{max}^n}, \quad (7.23)$$

- $NC_1 = 2$ a $NS = 3$:

$$p_5 = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{n-NS} BC_{max-i}}{BC_{max}^n}, \quad (7.24)$$

- $NC_1 = 2, NC_2 = 2$ a $NS = 1$:

$$p_6 = \frac{1}{2} \binom{n}{NC_2} \binom{n-NC_1}{NC} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{NC_1+NC_2} BC_{max-i}}{BC_{max}^n}, \quad (7.25)$$

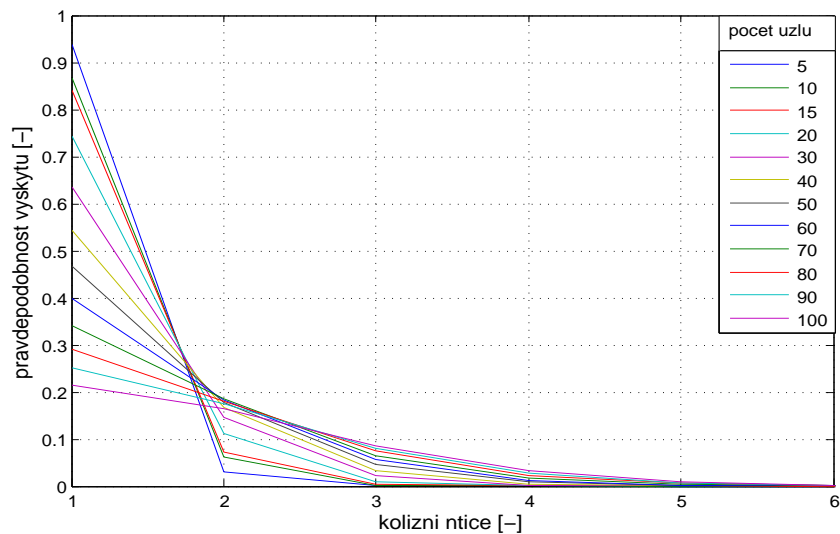
- $NC = 0$ a $NS = 5$:

$$p_7 = \frac{\prod_{i=0}^{NS} BC_{max-i}}{BC_{max}^n}, \quad (7.26)$$

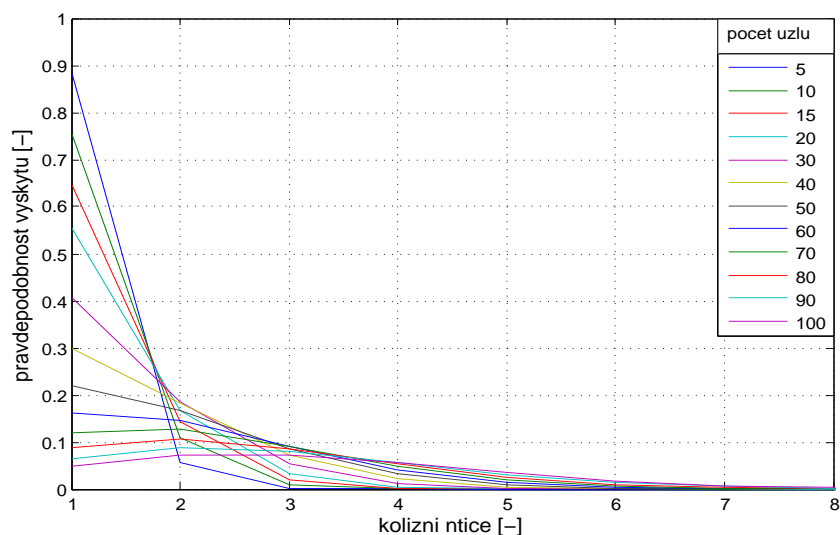
kde

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (7.27)$$

Na základě vyčíslení těchto pravděpodobností je možné vyčíslit, s jakou pravděpodobností se v systému objeví n -tice stejných hodnot. Odvozování všech kombinací pro větší počet uzlů je realizováno obdobným způsobem. Při větším počtu uzlů je počet kombinací stavů, které mohou nastat, vysoký a odvození všech variant je časově náročné. Proto byl realizován simulační skript, který vyhodnocuje počet všech stavů jednotlivých kombinací. Obr.7.4 ukazuje grafické znázornění pravděpodobnosti výskytu kolizních n -tic pro prioritní režim CA1. Obr.7.4 ukazuje grafické znázornění pravděpodobnosti výskytu kolizních n -tic pro prioritní režim CA2. Průběžné výsledky výpočtu těchto parametrů jsou v příloze E.



Obr. 7.4: Pravděpodobnost výskytu kolizních ntic technologie HomePlug pro prioritní režim CA1.



Obr. 7.5: Pravděpodobnost výskytu kolizních ntic technologie HomePlug pro prioritní režim CA2.

Pravděpodobnost úspěšného odeslání PS je vždy pro $NS = n$.

Pro všechny ostatní případy se systém nachází v kolizním stavu z důvodu vygenerování stejných hodnot parametru BC . Tato pravděpodobnost je dána součtem všech zbývajících pravděpodobností pn_i

$$P_C = \sum_{i=2}^n pn_i. \quad (7.28)$$

Pravděpodobnost, kdy se systém nachází v klidovém stavu je dán opačným jevem k P_C a P_S

$$P_I = 1 - P_C - P_S. \quad (7.29)$$

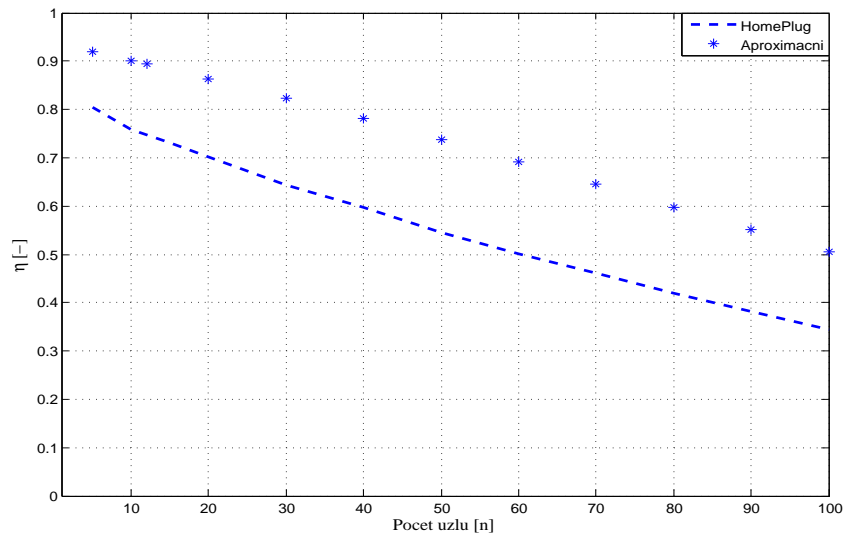
Na základě těchto výsledků, je možné vyjádřit propustnost jako

$$\eta = \frac{P_S * T_{FRA}}{P_S * T_S + P_C * T_C + P_I * T_I}, \quad (7.30)$$

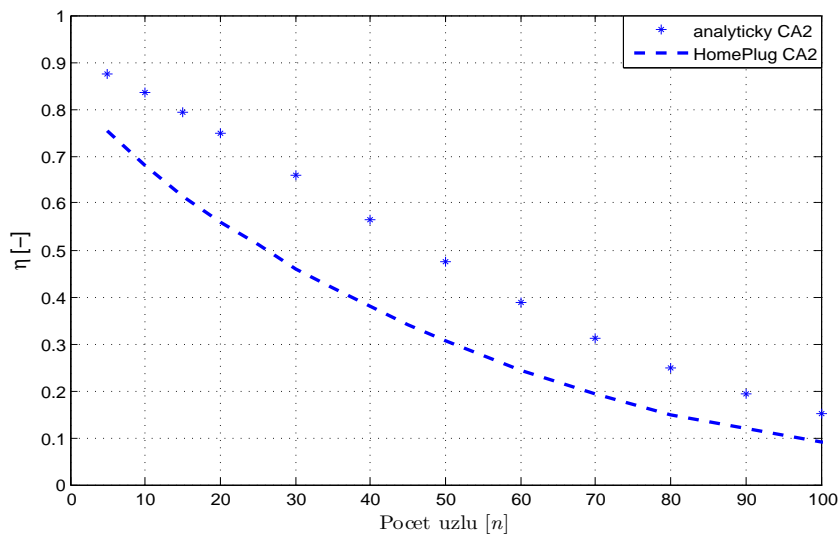
kde P_S je pravděpodobnost úspěšně odeslaných rámců, T_{FRA} je čas nutný pro odeslání jednoho rámce, který je daný přenosovou rychlostí technologie a maximální velikostí paketu na MAC vrstvě. T_S je čas nutný pro úspěšné odeslání a zpracování jednoho rámce. P_C je pravděpodobnost, že systém bude v kolizi. T_C je čas nutný pro zjištění kolize. P_I je pravděpodobnost, kdy se systém nachází v idle režimu a T_I je čas jednoho timeslotu.

Obr. 7.6 ukazuje výsledky aproximačního analytického modelu pro prioritní režim CA1. Obr. 7.7 ukazuje výsledky aproximačního analytického modelu pro prioritní režim CA2. Čárkované průběhy propustnosti jsou simulace standardního systému HomePlug. Za tímto účelem byl použit realizovaný, událostmi řízený, diskrétní simulátor. Tento průběh odpovídá 3D a 2D modelům, které byly publikovány ve [37] resp. ve [65]. Druhý průběh již odpovídá analytickým výsledkům. Z grafu je vidět, že analytické výsledky kopírují průběh klesání propustnosti v celém pásmu. Hodnoty analytických výsledků však vychází +10%. To je pravděpodobně způsobeno aproximací, která byla provedena.

I přesto, že výsledky nevycházejí zcela podle představ, je možné je považovat za využitelné z důvodu výhod, které tato metoda nabízí.



Obr. 7.6: Výsledky analytického modelu pro prioritní režim CA1.



Obr. 7.7: Výsledky analytického modelu pro prioritní režim CA2.

Mezi výhody realizovaného modelu jsou rychlost a menší výpočetní nároky na analýzu. To platí i pro běžnou, událostmi řízenou simulaci, jejíž doba trvání převyšovala dobu výpočtu analytického modelu.

7.4 Shrnutí modelování přístupové vrstvy

Kapitola se zabývá modelováním přístupové vrstvy systému HomePlug. Při řešení aproximačního modelu byly realizovány simulační modely, které potvrzují výsledky a funkčnost již publikovaných přístupů (2D model [37] a 3D model [65]). Simulace naznačovaly, že získání výsledky obou modelů jsou téměř jednotné. Na základě tohoto, byl stanoven jednodimenzionální saturační simulační model. Tento model ukazuje, že rekursivní závislost v algoritmu výrazně neovlivňuje výsledky simulací [14].

V tomto ohledu jsou stanoveny hodnoty aproximačního modelu, do kterého vstupuje velikost okna backoff procedury jako základní parametr backoff algoritmu technologie HomePlug. Pro prioritní režim CA1 byla maximální velikost tohoto okna omezena na maximální hodnotu specifikace HomePlug $BC_{max} = 64$. Pro druhý prioritní režim CA2 byla maximální velikost tohoto okna omezena na maximální hodnotu specifikace HomePlug $BC_{max} = 32$.

Jsou stanoveny teoretické předpoklady pravděpodobnostních funkcí do pěti uzlů. Při zvyšujícím počtem uzlů dochází ke zvyšování počtu možných kombinací. Pro takový počet kombinací je pak obtížné specifikovat všechny pravděpodobnostní funkce do požadovaného počtu uzlů (počet uzlů byl pro porovnání stanoven také na 100).

K zajištění těchto pravděpodobností do modelu a jeho ověření, byl realizován simulační skript. Na základě simulací byly následně vyhodnoceny hodnoty těchto pravděpodobností numerickou analýzou. Získané hodnoty pravděpodobnostních funkcí jsou pak vstupními parametry do výpočtu propustnosti.

Výsledky modelu naznačují, že v důsledku aproximace dochází k mírnému zkreslení. Charakter průběhu kopíruje průběh standardní propustnosti technologie HomePlug.

ZÁVĚR

Datové přenosy po silnoproudých vedeních jsou jednou z možností poskytování komplexních telekomunikačních služeb. Tato disertační práce se zaměřuje na podrobnou analýzu nejvýraznějšího zástupce v oblasti širokopásmových přenosů po silnoproudých vedeních, technologii HomePlug. Především se práce zaměřuje na přístupovou metodu, která do značné míry ovlivňuje chování síťových technologií.

V navazující části jsou kladeny základní cíle. Jedním z hlavních cílů práce je zjednodušení současných modelů pro technologii a optimalizace distribuční funkce algoritmu HomePlug.

Na stanovené dílčí cíle navazuje podrobná analýza základních norem a řešení v této oblasti, která tak shrnuje současný stav řešení v problematice PLC. V další části současného stavu řešení se práce již zaměřuje na shrnutí základních poznatků z oblasti přístupových metod. Seznamuje se základními algoritmy, které byly vyvinuty pro oblast přístupových sítí.

Na současný stav navazuje podrobná analýza vybrané technologie HomePlug. V této části se práce zaměřuje na analýzu přístupové vrstvy. Je zde především provedena základní analýza přístupového algoritmu. Ten je porovnán s bezdrátovou technologií 802.11b, z které daná přístupová metoda vychází. Z výsledků je patrné, že standard HomePlug se zaměřil na predikci kolize a tím zvýšení propustnosti algoritmu.

Pro potřebu analýzy byly realizovány diskrétní simulační modely v prostředí Matlab. Ty vycházely z již publikovaných možných přístupů modelování. Na základě analýzy vyplynulo, že některé části těchto modelů mohou být do jisté míry aproximovány. To umožnilo některé simulace značně urychlit. Byl realizován aproximační model pro numerickou analýzu. Tento model aproximuje procedurální kola technologie HomePlug tím, že je svazuje pouze do jednoho procedurálního kola.

Aproximační diskrétní numerický model byl využit pro analýzu různých distribučních funkcí. Průběžné výsledky z analýz přístupové metody v technologii HomePlug naznačují, že závislost zatížení sítě na generování parametrů přístupové metody je jedna z možností, jak také předcházet snížení propustnosti při větším počtu uzlů. Při nízkém počtu uzlů jsou tyto rozdíly zanedbatelné. Využíváním adaptivních algoritmů je síti umožněno se dynamičtěji přizpůsobovat.

Poslední kapitolou je realizace zcela nového přístupu k analytickému modelování přístupové vrstvy HomePlug. V této části byl realizován analytický model, který popisuje systém na základě pravděpodobnosti výskytu jednotlivých kolizních stavů. Výsledky modelu se liší od simulačního průběhu cca o +10% v celé šíři. To bylo pravděpodobně způsobeno aproximací rekursivních funkcí algoritmu. Tento způsob umožní do budoucna rychleji a efektivněji zkoumat jednotlivé distribuční funkce,

což doposud bylo se stávajícími Markovými modely časově značně náročné.

Všechny stanovené cíle byly splněny. Práce se předně soustředila na přístupové metody. K dosažení dílčích cílů analýzy a simulace vybrané technologie HomePlug byly realizovány simulační skripty. V rámci práce byla provedena optimalizace distribučních funkcí backoff algoritmu. Výsledky ukazují, že tato cesta optimalizace je vhodná pro větší počet uzlů v síti. Pro ověření stávajících modelů byl realizován událostmi řízený simulátor, jehož dílčí výsledky vedly k návrhu vlastního analytického modelu. Tento model byl analyticky a numericky ověřen. Realizovaný model je jednodušší a umožňuje rychleji a efektivněji zkoumat propustnost backoff algoritmů, ovšem s menší přesností než modely předcházející. Tato skutečnost může pomoci v budoucnu při zkoumání dalších algoritmů nejen v této oblasti. Hlavní přínosy této práce byly průběžně publikovány v tuzemských a zahraničních časopisech a konferencích. Výsledky této práce budou podkladem pro další výzkum v této oblasti.

LITERATURA

Vybrané publikace autora

- [1] HOŠEK, J., KOUTNÝ, M. Simulation of QoS diffserv technology in Opnet Modeler. In *Proceedings of 31th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Budapest: Asszisztencia Szervezo Kft., August 2008. pp. 1–6. ISBN 978-963-06-5487- 6.
- [2] HOŠEK, J., KOUTNÝ, M. Zabezpečení technologie VoIP pomocí protokolu ZRTP. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>). 2008, roč. 11, s. 11. ISSN 1213-1539.
- [3] KOUTNÝ, M. Design of secure communications for measuring equipment networks. In *International Conference - Research in Telecommunication Technology RTT 2007*. ISBN 978-80-8070-735-4.
- [4] KOUTNÝ, M., HOŠEK, J. Návrh kryptografického zabezpečení systémů hromadného sběru dat. *Elektrorevue - Internetový časopis*. 2007, roč. 52, s. 1–8. ISSN 1213-1539.
- [5] KOUTNÝ, M., HOŠEK, J. The system for real time measuring based on GPRS technology. In *Proceedings of 31th International Conference on Telecommunications and Signal Processing 2008*. ISBN 978-963-06-5487-6.
- [6] KOUTNÝ, M., ŠILHAVÝ, P., HOŠEK, J. Data collection system design in SSM networks with unicast feedback: server message definition. *WSEAS Trans. Info. Sci. and App.* February 2009, vol. 6, pp. 253–262. ISSN 1790-0832.
- [7] KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J. Authentication and encryption algorithms of electrometer communication unit for remote data collection. *International Transaction on Computer Science and Engineering*. 2007, vol. 44, p. 4. ISSN 1738- 6438.
- [8] KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J., MLÝNEK, P. A secure system for data collection in GSM networks. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2008, roč. 11, s. 5. ISSN 1738-7906.
- [9] KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J., MLÝNEK, P. Design of mass data acquisition system in multicast networks. In *32nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Editor sszisztencia Szervezo Kft. August 2009. pp. 1–4. ISBN 978-963-06-7716-5.

- [10] KOUTNÝ, M., MLÝNEK, P., MIŠUREC, J. Modelování silnoproudých vedení i – metody. *Access server*. 2010, roč. 7, s. 5. ISSN 1214-9675.
- [11] KOUTNÝ, M., MLÝNEK, P., MIŠUREC, J. Power line modelling for creating PLC communication system. *International Journal of Communication*. 2010, vol. 4, no. 1, pp. 13–21. ISSN 1998-4480.
- [12] KOUTNÝ, M., MLÝNEK, P., MIŠUREC, J. Modeling and evaluation of power line for smart grid communication. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011, vol. 8, pp. 228–232, IF:0,196. ISSN 0033-2097.
- [13] KOUTNÝ, M., MLÝNEK, P., MRAKAVA, P. Homeplug simulation model for analysis of the rounding functions. In *34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing* 2011. p. 4. ISBN 978-1-4577-1409-2.
- [14] KOUTNY, M., MLYNEK, P., MISUREC, J. Homeplug throughput analysis using numerical models. In *The 13th International Conference on Research in Telecommunication Technologies* 2011. ISBN 978-80-214-4283-2.
- [15] KRAJSA, O., KOUTNÝ, M. Possibilities of utilization of the FMT modulation in PCL systems. In *9-th International Conference - Research in Telecommunication Technology RTT* FEI STU Bratislava, 2008. ISBN 978-80-227-2939-0.
- [16] MLÝNEK, P., KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J. OFDM model for power line communication. In *Proceedings of the 4th international conference on Communications and information technology*. Stevens Point, Wisconsin, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2010. CIT'10, pp. 161–164. ISBN 978-960-474-207-3.
- [17] MLÝNEK, P., KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J. Power line cable transfer function for modelling of power line communication systems. *Journal of Electrical Engineering*. 2011, vol. 2, pp. 4, IF: 0.235. ISSN 1335-3632.

Použité zdroje cizích autorů

- [18] ABRAMSON, N. THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications. In *Proceedings of the November 17-19, 1970, fall joint computer conference*. New York, NY, USA: ACM, 1970. AFIPS '70 (Fall), pp. 281–285. <http://doi.acm.org/10.1145/1478462.1478502>.
- [19] *IEEE 802.4 Token Passing Bus Access Method* ANSI/IEEE Std., 1985.

- [20] *IEEE 802.5 Token Ring Access Method and Physical Layer Specifications* ANSI/IEEE Std., 1985.
- [21] *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band*, ANSI/IEEE Std., 1999.
- [22] *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment: Medium Access Method (MAC) Quality of Service Enhancements* ANSI/IEEE Std., 2005.
- [23] BABIC, M. ET AL. Theoretical postulation of PLC channel model. *Open PLC European Research Alliance*. 2005, vol. 1, p. 71. ISSN 1844-6035.
- [24] BIANCHI, G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*. March 2000, vol. 18, no. 3, pp. 535 –547. ISSN 0733-8716.
- [25] BIANCHI, G. ET AL. C-PRMA: a centralized packet reservation multiple access for local wireless communications. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*. May 1997, vol. 46, no. 2, pp. 422 –436. ISSN 0018-9545.
- [26] BIANCHI, G., TINNIRELLO, I., CONIGLIARO, G. Design and performance evaluation of an hybrid reservation-polling MAC protocol for power-line communications. *International Journal of Communication Systems*. 2003, vol. 16, no. 5, pp. 427–445. <http://dx.doi.org/10.1002/dac.597>. ISSN 1099-1131.
- [27] CARCELLE, X. *Power Line Communications in Practice*. 1 edition. Artech House, January 2009. 370 p. ISBN 978-1596933354.
- [28] *50065-1:2001: Specification for signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz. General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances* CENELEC, 2010.
- [29] *European Committee for Electrotechnical Standardization* CENELEC, 2010. <http://www.cenelec.eu/>.
- [30] CHIRAS, T., KOUTSAKIS, P., PATERAKIS, M. GEN01-2: A new MAC protocol for broadband powerline communications networks. In *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE* December 2006. pp. 1 –6. ISSN 1930-529X.

- [31] CHUNG, M. Y. ET AL. Performance analysis of HomePlug 1.0 MAC with CSMA/CA. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*. July 2006, vol. 24, no. 7, pp. 1411 – 1420. ISSN 0733-8716.
- [32] COFFEY, T., GRIFFIN, J., MOORE, J. A media access control protocol for a powerline local area network. In *ISPLC 1998*. ISBN 90-74249-18-3.
- [33] COMPANY, A. D. L. *White Paper on Power Line Communications*. 2004.
- [34] CONSORTIUM, T. O. “*OPERA Specification Part 1: Technology, Part 2: System*” The OPERA Consortium, January 2006. Technical report.
- [35] DARPA. *The Network Simulator - ns-2*. <http://isi.edu/nsnam/ns/>.
- [36] DAVIS, J. ET AL. *Single conductor power line communications system* United States Patent, 1987.
- [37] DE SIQUEIRA CAMPOS, A. L. P., DE OLIVEIRA, M. R. C., DE ARAUJO LINCOLN MACHADO. Performance analyses of computer network that uses the homeplug 1.0 standard. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*. September 2007, vol. 5, no. 5, pp. 360 –366. ISSN 1548-0992.
- [38] DIMITRIADIS, G., PAVLIDOU, F.-N. A performance study of EY-NPMA for medium access in power line communications. In *Proc. of the 7th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications* 2003. pp. 254–258. ISBN 978-0470740309.
- [39] DO, L. P., HRASNICA, H., BUMILLER, G. Investigation of MAC protocols for single frequency network technique applied in powerline communications. In *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on* April 2005. pp. 22 – 26. ISBN 0-7803-8844-5.
- [40] DO, L. P., HRASNICA, H., BUMILLER, G. SALA MAC protocol for PLC networks based on single frequency network technique. In *Power Line Communications and Its Applications, 2006 IEEE International Symposium on* 2006. pp. 172 –177. ISBN 1-4244-0113-5.
- [41] DOSTERT, K. *Powerline Communications*. Prentice Hall, 2001. 352 p. ISBN 978-0130293428.
- [42] DOULIGERIS, C. Intelligent home systems. *Communications Magazine, IEEE*. October 1993, vol. 31, no. 10, pp. 52 –61. ISSN 0163-6804.

- [43] *The EU climate and energy package - 20-20-20 targets* EU, 3 2007.
http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm.
- [44] EU. *MeRegio - Minimum Emission Region* MeRegio, 2008-2012.
<http://www.meregio.de/en>.
- [45] *Smart electricity grids: Technology Information Sheet* European Commission - Setis - strategic energy technologies information system.
<http://setis.ec.europa.eu/newsroomitemsfolder/smartelectricitygrids-technologyinformationsheet/>.
- [46] FAURE, J.-P. The IEEE p1901 project: broadband over power lines. In *Consumer Electronics, 2006. ICCE '06. 2006 Digest of Technical Papers. International Conference on* January 2006. pp. 159 –160. ISBN 0-7803-9459-3.
- [47] FU, K., GUO, Y. J., BARTON, S. K. Performance of the EY-NPMA protocol. *Wirel. Pers. Commun.* January 1997, vol. 4, pp. 41–50.
<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=609239.609298>. ISSN 0929-6212.
- [48] GELLINGS, C. W. *The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response*. CRC Press, 2009. ISBN 978-1439815748.
- [49] GERSHON, R., PROPP, D., PROPP, M. A token passing network for powerline communications. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*. May 1991, vol. 37, no. 2, pp. 129 –134. ISSN 0098-3063.
- [50] HASS, E. *Communications Systems* 2010. http://www.kns.dlr.de/People/Haas/Welcome/Welcome_us.html.
- [51] *HomePlug 1.0 Technology White Paper* HomePlug Powerline Alliance, 2001.
<http://www.homeplug.org>.
- [52] *HomePlug 1.0.1 Specification* HomePlug Powerline Alliance, 12 2001.
<https://www.homeplug.org>.
- [53] *HomePlug AV White Paper* HomePlug Powerline Alliance, 2005.
<https://www.homeplug.org>.
- [54] *HomePlug Powerline Alliance* HomePlug Powerline Alliance, 10 2010.
<http://www.homeplug.org>.
- [55] HRASNICA, H., HAIDINE, A. Modeling MAC layer for powerline communications networks. In *Internet Quality and Performance and Control of Network Systems*. Editors Angela L. Chiu, Frank Huebner a Robert D. van der Mei SPIE, 2001. vol. 4211, pp. 70–81. ISBN 1-874653-60-7.

- [56] HRASNICA, H., HAIDINE, A., LEHNERT, R. Reservation MAC protocols for powerline communications. In *ISPLC2001 - 5 TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER-LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS, 4 - 6 APRIL 2001* 2001. ISBN 0-7803-7123-2.
- [57] HRASNICA, H., HAIDINE, A., LEHNERT, R. *Broadband Powerline Communications Network Design*. Willey, 2004. 275 p. ISBN 978-0470857410.
- [58] HRASNICA, H., LEHNERT, R. Powerline communication for access networks – performance study of the MAC layer. In *III international conference on telecommunications bihtel 2000 "Telecommunication networks"- Sarajevo, Bosnia and Herzegovina* 2000. ISBN 3-519-06430-8.
- [59] HU, C. ET AL. *An Analysis of the Binary Exponential Backoff Algorithm in Distributed MAC Protocols*. 2005.
- [60] HWANG, W.-J., TODE, H., MURAKAMI, K. QoS based MAC protocol for the home network. In *Local Computer Networks, 2001. Proceedings. LCN 2001. 26th Annual IEEE Conference on* 2001. pp. 324 –333. ISBN 0-7695-1321-2.
- [61] IEC/TS. *Distribution automation using distribution line carrier systems - Part 5-2: Lower layer profiles - Frequency shift keying (FSK) profile* IEC/TS, May 1998. Technical report.
- [62] *802.3i-1990 - IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Supplement to 802.3 - System Considerations for Multisegment 10 M/S Baseband Networks (Section 13) and Twisted-Pair Medium Attachmen* IEEE Computer Society, 1990. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3i-1990.html>.
- [63] *802.3ab-1999 - IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications - Physical Layer Parameters and Specifications for 1000 Mb/s Operation over 4 pair of Category 5 Balanced Copper Cabling, Type 1000BASE-T* IEEE Computer Society, 1999. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3ab-1999.html>.
- [64] *Data link layer (DLL) for unified high-speed wire-line based home networking transceivers* ITU - International Telecommunication Union, 2010.
- [65] JUNG, M.-H., CHUNG, M. Y., LEE, T.-J. MAC throughput analysis of HomePlug 1.0. *Communications Letters, IEEE*. February 2005, vol. 9, no. 2, pp. 184 – 186. ISSN 1089-7798.

- [66] KIM, M.-S. ET AL. A simulation study of the PLC-MAC performance using network simulator-2. In *Power Line Communications and Its Applications, 2008. ISPLC 2008. IEEE International Symposium on* April 2008. pp. 99 –104. ISBN 978-1-4244-1975-3.
- [67] LIN, Y.-J. ET AL. Periodic contention-free multiple access for broadband multimedia powerline communication networks. In *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on* April 2005. pp. 121 –125. ISBN 0-7803-8844-5.
- [68] LIN, Y.-J. ET AL. A comparative performance study of wireless and power line networks. *Communications Magazine, IEEE*. April 2003, vol. 41, no. 4, pp. 54 – 63. ISSN 0163-6804.
- [69] LIVNEH, N. ET AL. Frequency hopping CDMA for future cellular radio. In *Vehicular Technology Conference, 1992, IEEE 42nd* May 1992. pp. 400 –404 vol.1. ISSN 1090-3038.
- [70] MING LEI, Z. ET AL. QoS based media access control in a class of networked control systems. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on* September 2007. pp. 2016 –2019. ISBN 978-1-4244-1311-9.
- [71] MIŠUREC, J. Interference in data communication over narrow-band PLC. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2008, vol. 8, no. 11, pp. 281–285. ISSN 1738- 7906.
- [72] MLÝNEK, P., MIŠUREC, J. Systémy PLC pro dálkový sběr měřených dat. *Elektrorevue*. 2009, roč. 1, s. 5. ISSN 1213-1539.
- [73] MODIANO, E. An adaptive algorithm for optimizing the packet size used in wireless ARQ protocols. *Wireless Networks*. 1999, vol. 5, p. 279–286. ISSN 1572-8196.
- [74] MOENECLAHEY, M., BLADEL, M. V., SARI, H. Sensitivity of multiple-access techniques to narrow-band interference. *Communications, IEEE Transactions on*. March 2001, vol. 49, no. 3, pp. 497 –505. ISSN 0090-6778.
- [75] ONUNGA, J., DONALDSON, R. Distribution line communications using CSMA access control with priority acknowledgements. *Power Delivery, IEEE Transactions on*. April 1989, vol. 4, no. 2, pp. 878 –886. ISSN 0885-8977.

- [76] OPENMETER. *D 2.1 Part 2 Description of current State-Of-The-Art of technology and protocols, Description of State-Of-The-Art PLC based access technology* The OPEN meter Consortium, May 2009. First Draft 2.3, no. No. 226369.
- [77] OPERA. *Open PLC European Research Alliance*. Naposledy navštíveno 27. 7. 2010. <http://www.ist-opera.org/>.
- [78] OPNET. *Opnet - Opnet Modeler*. 2010. <http://www.opnet.com>.
- [79] PAPALEONIDOPOULOS, I. ET AL. Modelling of indoor low voltage power-line cables in the high frequency range. In *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)* 2002. ISBN 90-74249-16-7.
- [80] PARK, B.-S., KANG, C.-S., LEE, Y.-H. Performance evaluation and modeling for korea standard of PLC MAC. In *Future Generation Communication and Networking, 2008. FGNCN '08. Second International Conference on* december 2008. vol. 2, pp. 95 –98. ISBN 978-0-7695-3431-2.
- [81] PARK, J. Y., HONG, C. S., LEE, S. An efficient MAC scheme with modified RTS/CTS of IEEE P1901. In *Information Networking (ICOIN), 2011 International Conference on* January 2011. pp. 230 –234. ISSN 1976-7684.
- [82] *TDA5051 - Home automation modem* Philips Semiconductors, 1997.
- [83] PODHORSKÝ, J. *HDO - hromadné dálkové ovládání*. BEN, 2002. 120 s. roč. 1. ISBN 80-7300-054-7.
- [84] *PoweRline Intelligent Metering Evolution* PRIME Alliance, 2010. <http://www.ist-opera.org/>.
- [85] ROBERTS, A., LAWRENCE, G. ALOHA packet system with and without slots and capture. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* April 1975, vol. 5, pp. 28–42. <http://doi.acm.org/10.1145/1024916.1024920>. ISSN 0146-4833.
- [86] SCHWARTZ, M. *Telecommunication Networks: Protocols, Modeling and Analysis*. Prentice Hall, 1987. 724 p. ISBN 978-0201164237.
- [87] SECERBEGOVIC, E., BOLIC, M., BEGIC, Z. Distributed MAC for OFDM based powerline communication networks. In *ELMAR, 2008. 50th International Symposium* September 2008. vol. 1, pp. 299 –304. ISSN 1334-2630.
- [88] *SM2101 - Powerline FSK Transceiver* Semitech Semiconductors, 2010.

- [89] SHARON, O., ALTMAN, E. An efficient polling MAC for wireless LANs. *IEEE/ACM Trans. Netw.* August 2001, vol. 9, pp. 439–451. <http://dx.doi.org/10.1109/90.944342>. ISSN 1063-6692.
- [90] *ST7538 - Powerline FSK Transceiver* ST Microelectronics, 2003.
- [91] *ST7580 - FSK, N-PSK multi-mode power line networking system-on-chip* ST Microelectronics, 2009.
- [92] *ST7590 - Narrow-band OFDM power line networking PRIME compliant system-on-chip* ST Microelectronics, 2009.
- [93] SUNDARESAN, S. ET AL. Distributed MAC protocols and priority oriented scheduling for a plc access network. *Int. J. Communication Systems.* 2003, vol. 16, no. 5, pp. 475–495. ISSN 1099-1131.
- [94] TANENBAUM, A. S. *Computer Networks (4th Edition)*. 4 edition. Prentice Hall PTR, August 2002. ISBN 0130661023.
- [95] TREYTL, A., ROBERTS, N., HANCKE, G. Security architecture for power-line metering system. In *Factory Communication Systems, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Workshop on* September 2004. pp. 393 – 396. ISBN 0-7803-8734-1.
- [96] TRICKER, A. R. Effects of rounding on the moments of a probability distribution. *The Statistician.* 1984, vol. 33, no. 4, pp. 381–390. <http://dx.doi.org/10.2307/2987741>. ISSN 00390526.
- [97] TRIPATHI, K. ET AL. Contention window based parameter selection to improve powerline MAC efficiency for large number of users. In *Power Line Communications and Its Applications, 2006 IEEE International Symposium on* 2006. pp. 189 –193. ISBN 1-4244-0113-5.
- [98] TRULOVE, J. G. *The Smart House*. Collins Design, 2003. 192 p. ISBN 978-0060557423.
- [99] VANČATA, P. Standardizace širokopásmových systémů přenosu po energetickém vedení. *Access server.* 12 2005. <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2005112801>. ISSN 1214-9675.
- [100] WALBECK, A. K. ET AL. *Multi-channel power line exchange protocol* 12 2007. <http://www.freepatentsonline.com/7310670.html>.

- [101] WANG, B. ET AL. In-home power line communication media access control protocol based on collision resolution. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2009, vol. 14, pp. 645–650. 10.1007/s12204-009-0645-7. ISSN 1007-1172.
- [102] X, K., 4600-1. *Power Line Communication - Hight speed PLC Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). Part 1: General Requirements* Korea Industrial Standards, May 2006. Technical report.
- [103] ZABALLOS, A. ET AL. Simulation and modeling of the coexistence of polling and contention in PLC based AMR systems. In *Power Line Communications and Its Applications, 2007. ISPLC '07. IEEE International Symposium on* March 2007. pp. 110 –115. ISBN 1-4244-1090-8.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AMR	Automatic Meter Reading
ARQ	Automatic Repeat-reQuest
ASK	Amplitude-Shift Keying
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CIFS	Contention InterFrame Space
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EFG	End-of-Frame Gap
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FMT	Filtered Multitone Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
HDO	Hromadné dálkové ovládání
MAC	Medium Access Control
MPDU	MAC Protocol Data Unit
NN	Nízké napětí
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PLC	Power Line Communication
PPDU	PHY Protocol Data Unit
PR _x	Prioryti Resolution X
PSD	Power Spectral Density

QoS	Quality of Services
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RIFS	Response InterFrame Space
TDMA	Time Division Multiple Access
VN	Vysoké napětí
VoIP	Voice over Internet protocol
VVN	Velmi vysoké napětí

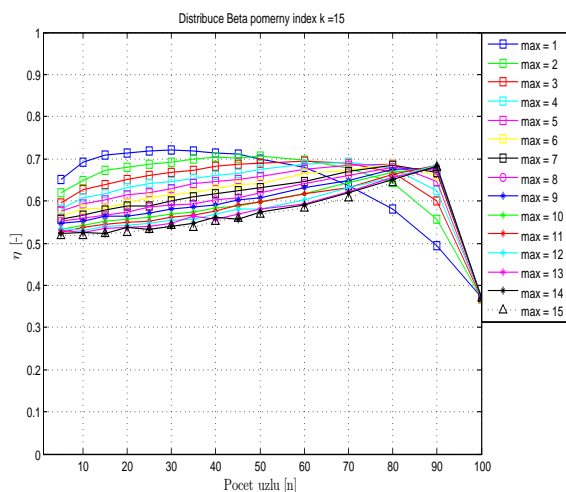
SEZNAM PŘÍLOH

A	Analýza propustnosti algoritmu HomePlug	103
A.1	Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - závislost parametrů na zatížení sítě	103
A.2	Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě	104
A.2.1	Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Distribuční rozdělení Beta	104
A.2.2	Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Exponenciální distribuční rozdělení	105
A.2.3	Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Weibullovo distribuční rozdělení . . .	106
B	Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug	107
B.1	Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - závislost parametrů na zatížení sítě	107
B.2	Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě	108
B.2.1	Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Distribuční rozdělení Beta	108
B.2.2	Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Exponenciální distribuční rozdělení	109
B.2.3	Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Weibullovo distribuční rozdělení . .	110
C	Analýza okna algoritmu HomePlug	111
C.1	Analýza okna algoritmu HomePlug - závislost parametrů na zatížení sítě	111
C.2	Analýza velikosti okna algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě	112
C.2.1	Analýza velikosti okna algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Distribuční rozdělení Beta	112
C.2.2	Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Exponenciální distribuční rozdělení	113

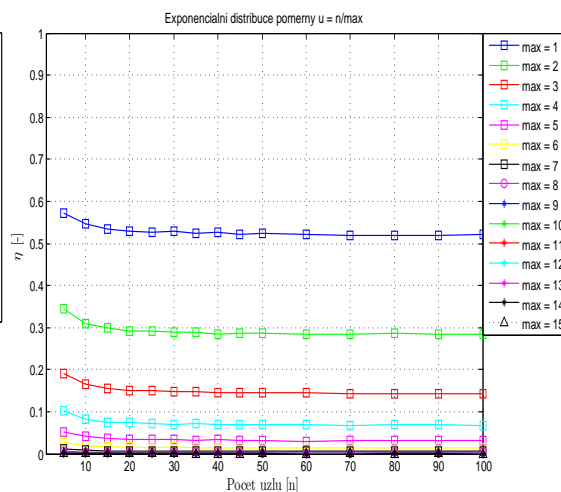
D	Odvození pravděpodobnostních funkcí vznikajících <i>ntic</i> v systému	114
D.1	Dva uzly v systému $n=2$	114
D.2	Tři uzly v systému $n=3$	114
D.3	Čtyři uzly v systému $n=4$	114
D.4	Pět uzlů v systému $n=5$	115
E	Průběžné výsledky výskytu <i>n-tic</i>	117

A ANALÝZA PROPUSTNOSTI ALGORITMU HOMEPLUG

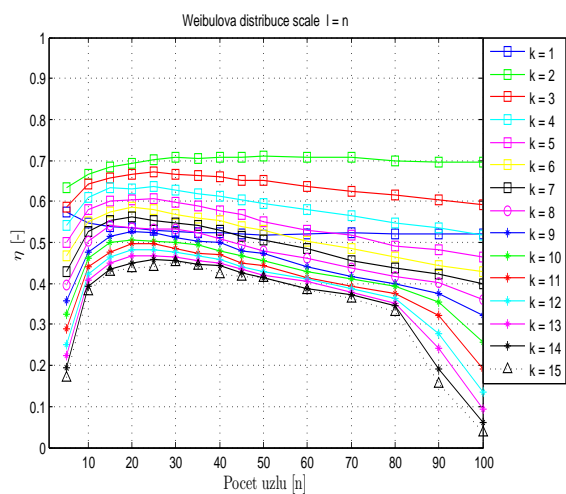
A.1 Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - závislost parametrů na zatížení sítě



(a) Distribuce beta



(b) Exponenciální distribuce



(c) Weibulova distribuce

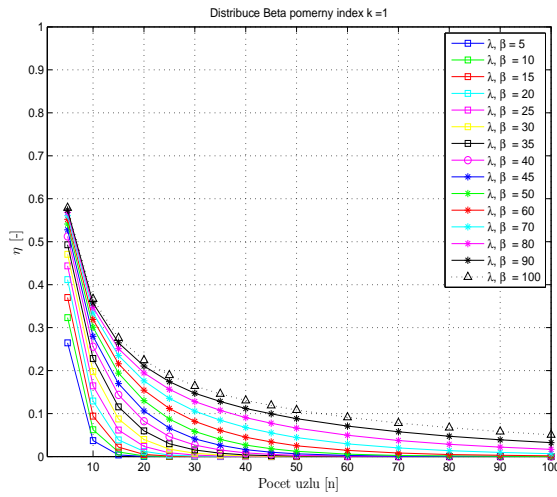
Obr. A.1: Analýza propustnosti algoritmu HomePlug

A.2 Analýza propustnosti algoritmu HomePlug

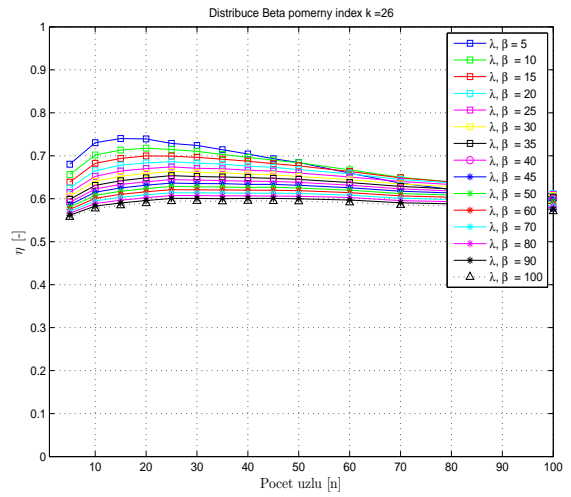
- nezávislost parametrů na zatížení sítě

A.2.1 Analýza propustnosti algoritmu HomePlug

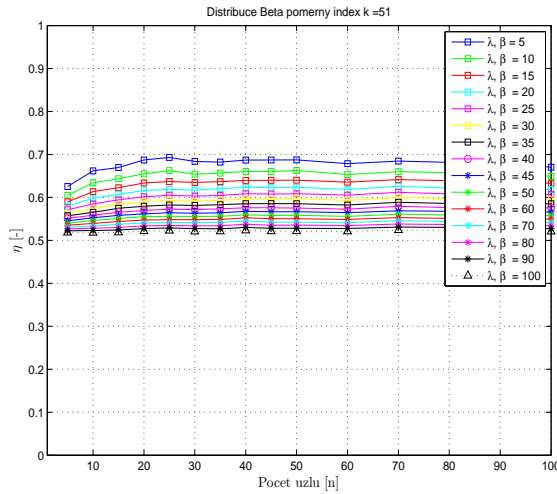
- nezávislost parametrů na zatížení sítě - Distribuční rozdělení Beta



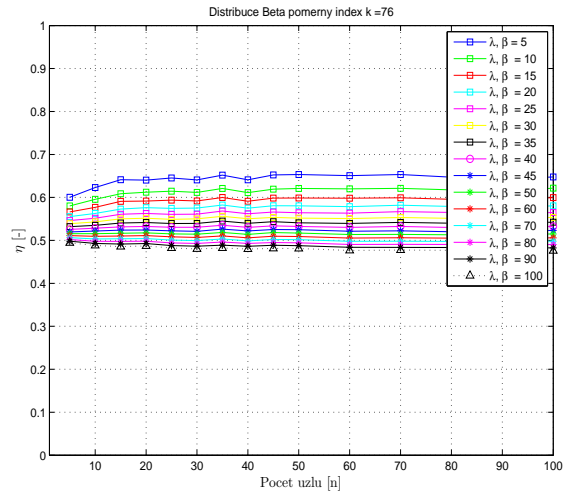
(a) $k=1$, $\lambda, \beta=n$



(b) $k=26$, $\lambda, \beta=n$



(c) $k=51$, $\lambda, \beta=n$



(d) $k=76$, $\lambda, \beta=n$

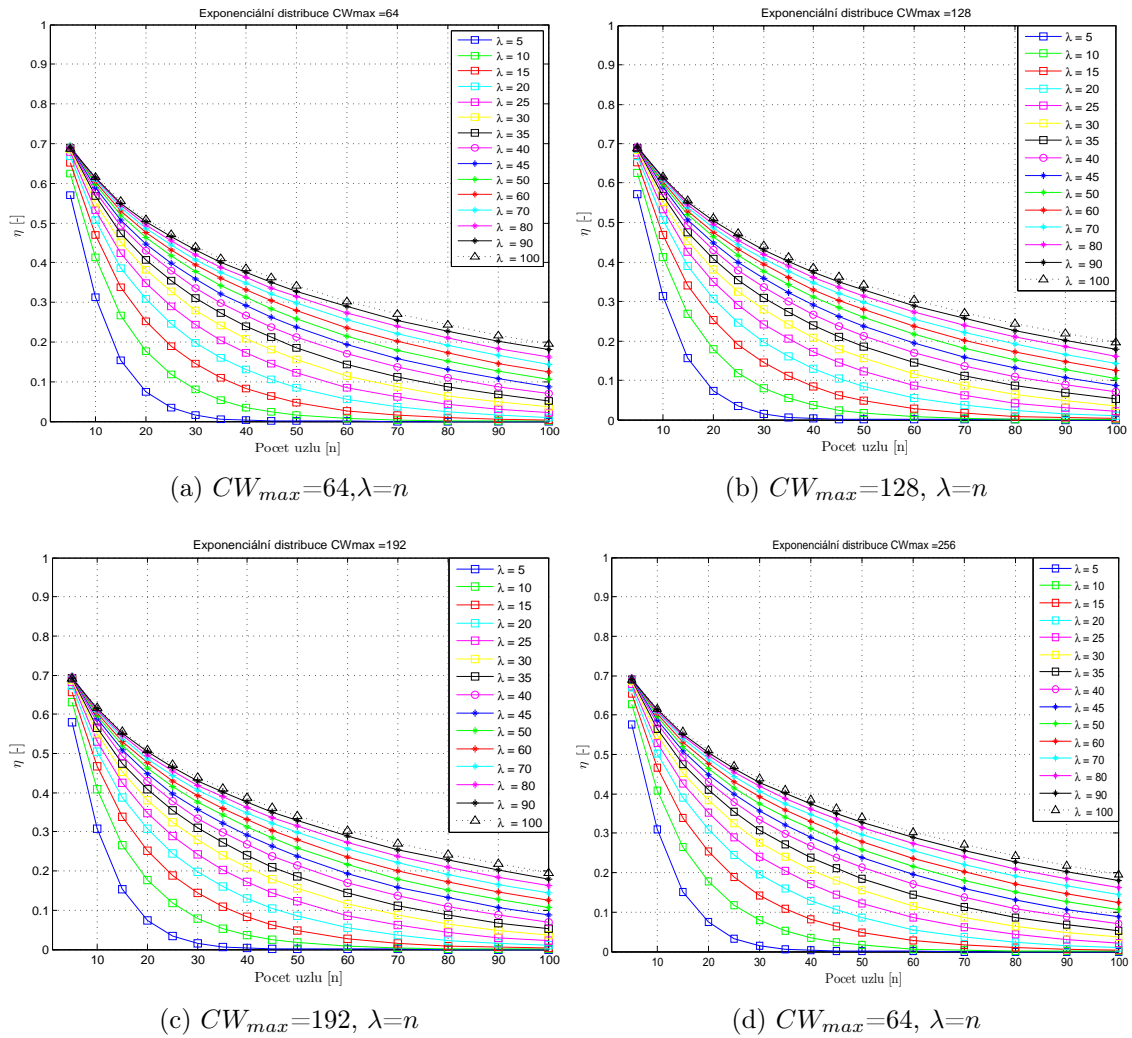
Obr. A.2: Distribuce beta - nezávislost generování okna na zatížení sítě, parametr $k=\langle 1, 26, 51, 76 \rangle$

A.2.2 Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Exponenciální distribuční rozdělení

Pro generování parametru BC byla využita funkce exponenciálního rozdělení. Maximální velikost okna byla zachována v násobku maximální velikosti okna parametru BC_{max} systému HomePlug.

$$BC_i = MIN(X_i, CW_{max}) \quad \text{pro } CW_{max} = n \cdot HomePlugBC_{max}. \quad (A.1)$$

kde X_i je hodnota vrácená funkcí exponenciálního rozdělení,



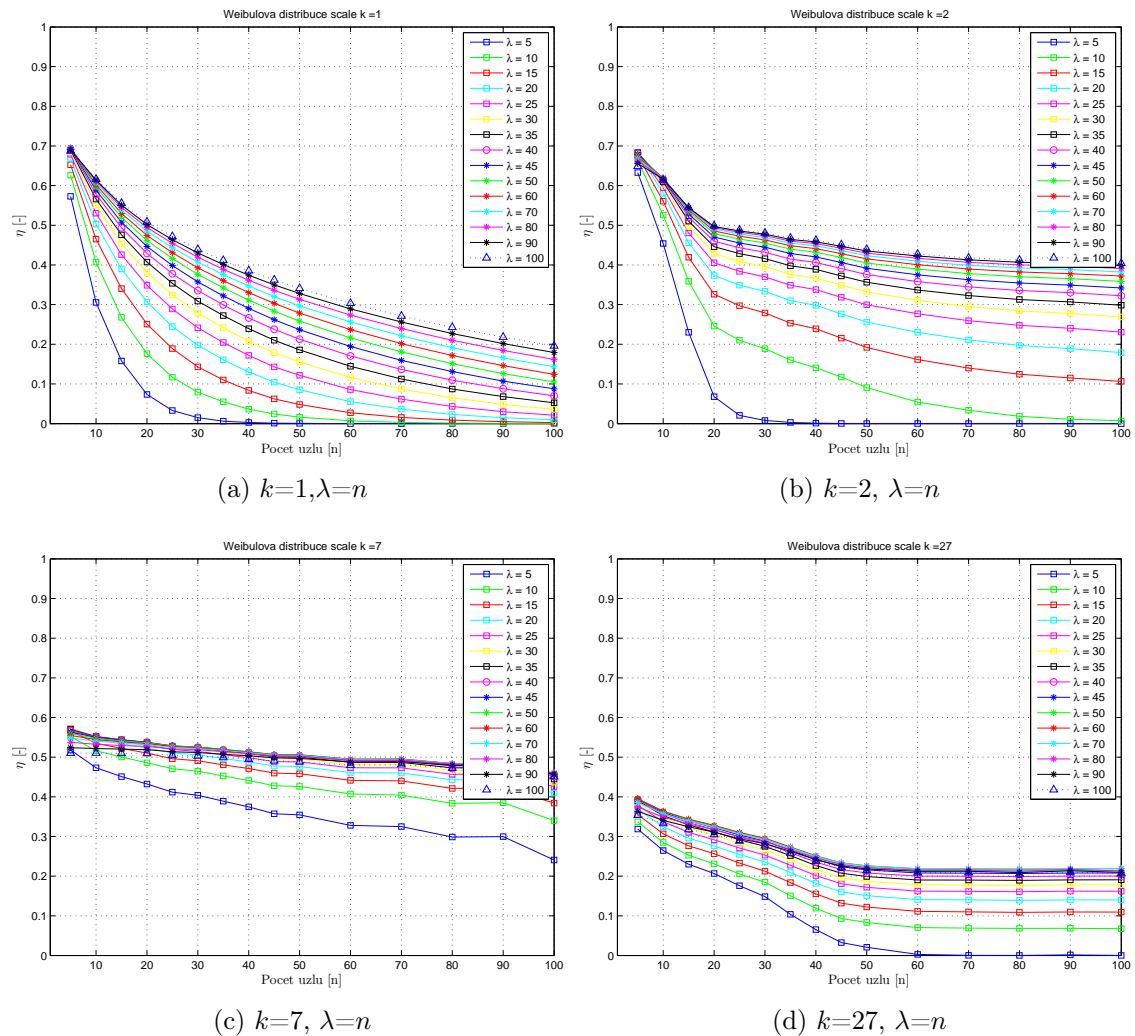
Obr. A.3: Exponenciální rozdělení - nezávislost generování okna na zatížení sítě

A.2.3 Analýza propustnosti algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Weibullovo distribuční rozdělení

Pro generování parametru BC byla využita funkce Weibullova rozdělení. Maximální velikost okna byla zachována podle standardu HomePlug $BC_{max}=64$.

$$BC_i = MIN(X_i, CW_{max}) \quad pro \quad CW_{max} = n \cdot HomePlugBC_{max}. \quad (A.2)$$

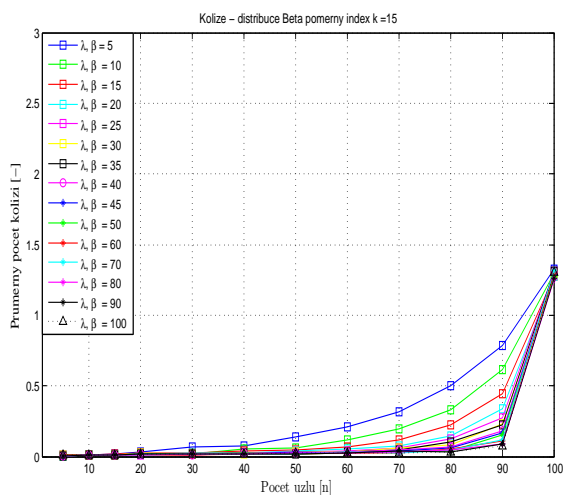
kde X_i je hodnota vrácená funkcí Weibullova rozdělení.



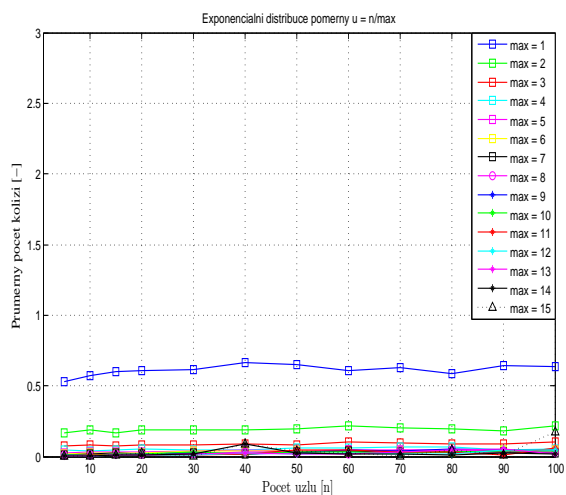
Obr. A.4: Weibullovo rozdělení - nezávislost generování okna na zatížení sítě

B ANALÝZA KOLIZNÍCH STAVŮ ALGORITMU HOMEPLUG

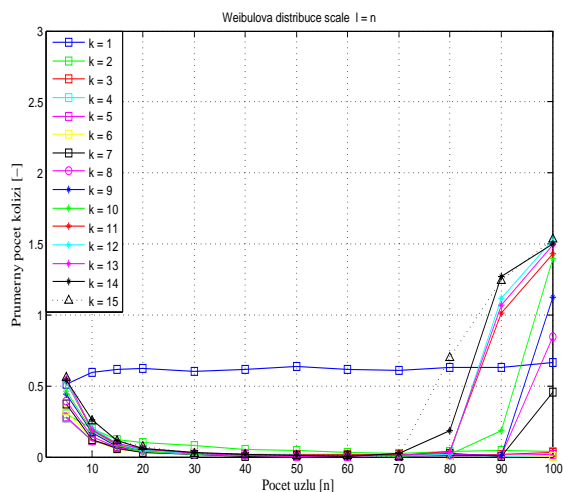
B.1 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - závislost parametrů na zatížení sítě



(a) Distribuce beta



(b) Exponenciální distribuce

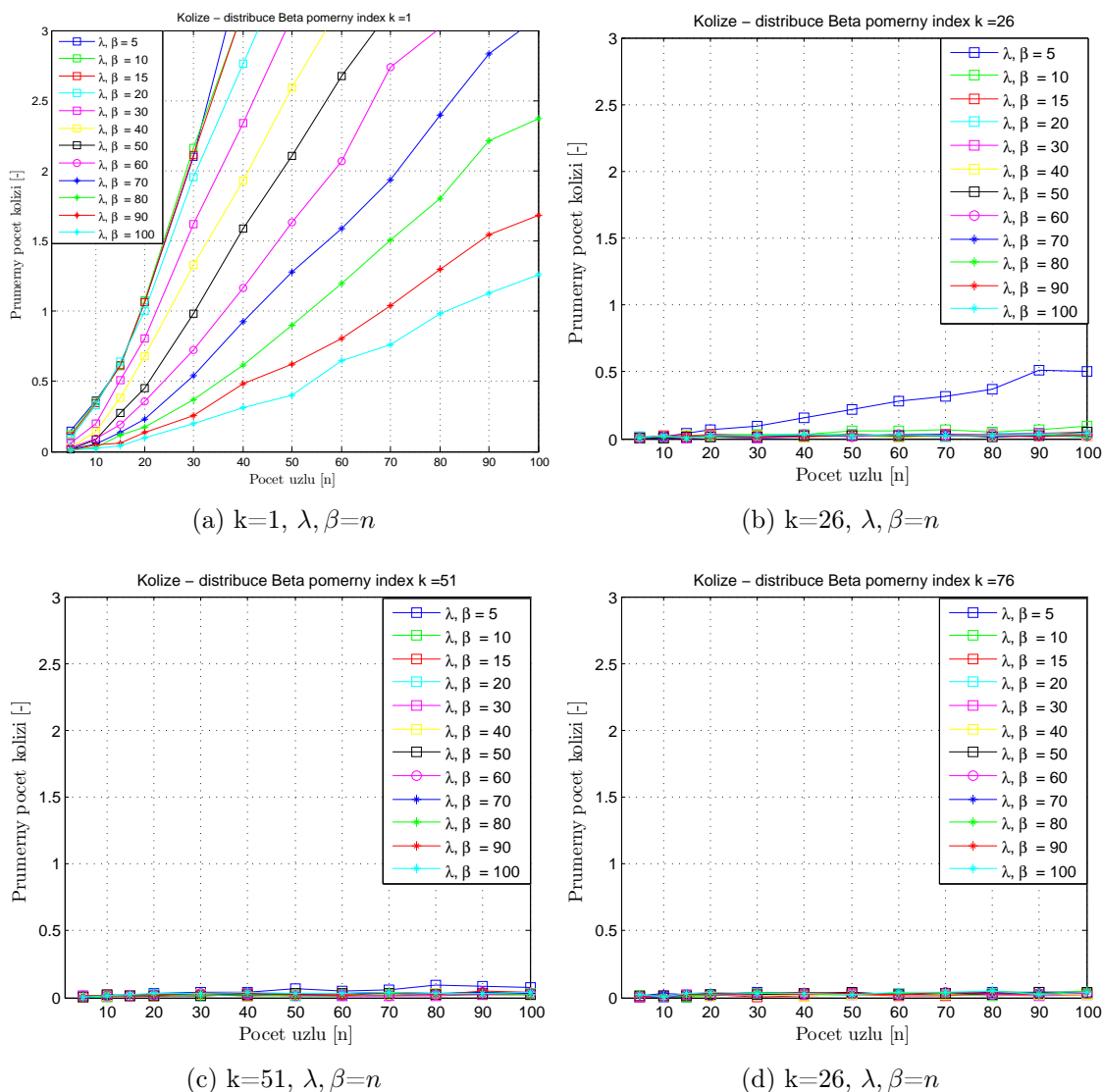


(c) Weibullova distribuce

Obr. B.1: Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug

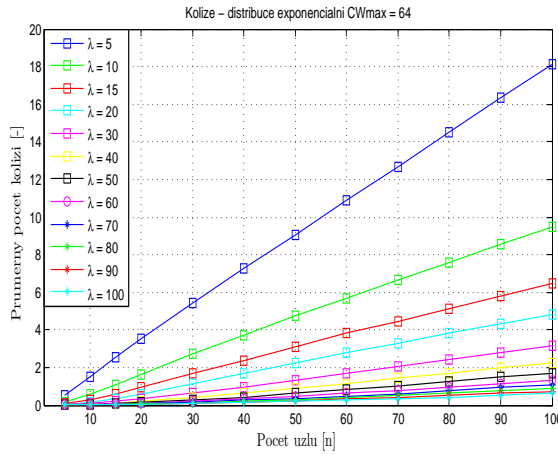
B.2 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě

B.2.1 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Distribuční rozdělání Beta

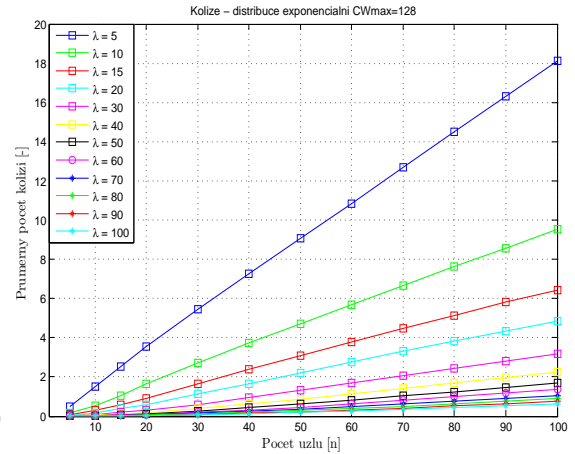


Obr. B.2: Distribuční beta - nezávislost generování okna na zatížení sítě, parametr $k=\{1, 26, 51, 76\}$

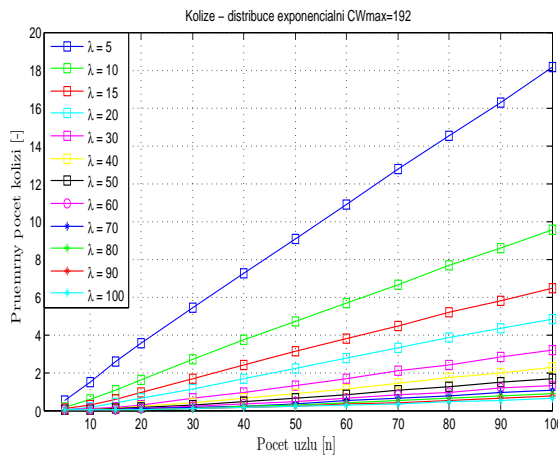
B.2.2 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Exponenciální distribuční rozdělení



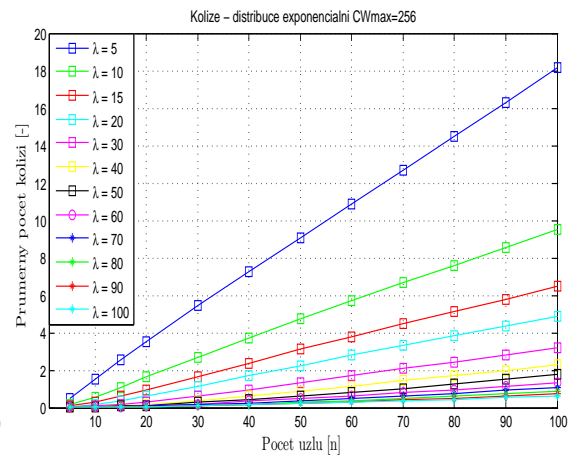
(a) $CW_{max}=64, \lambda=n$



(b) $CW_{max}=128, \lambda=n$



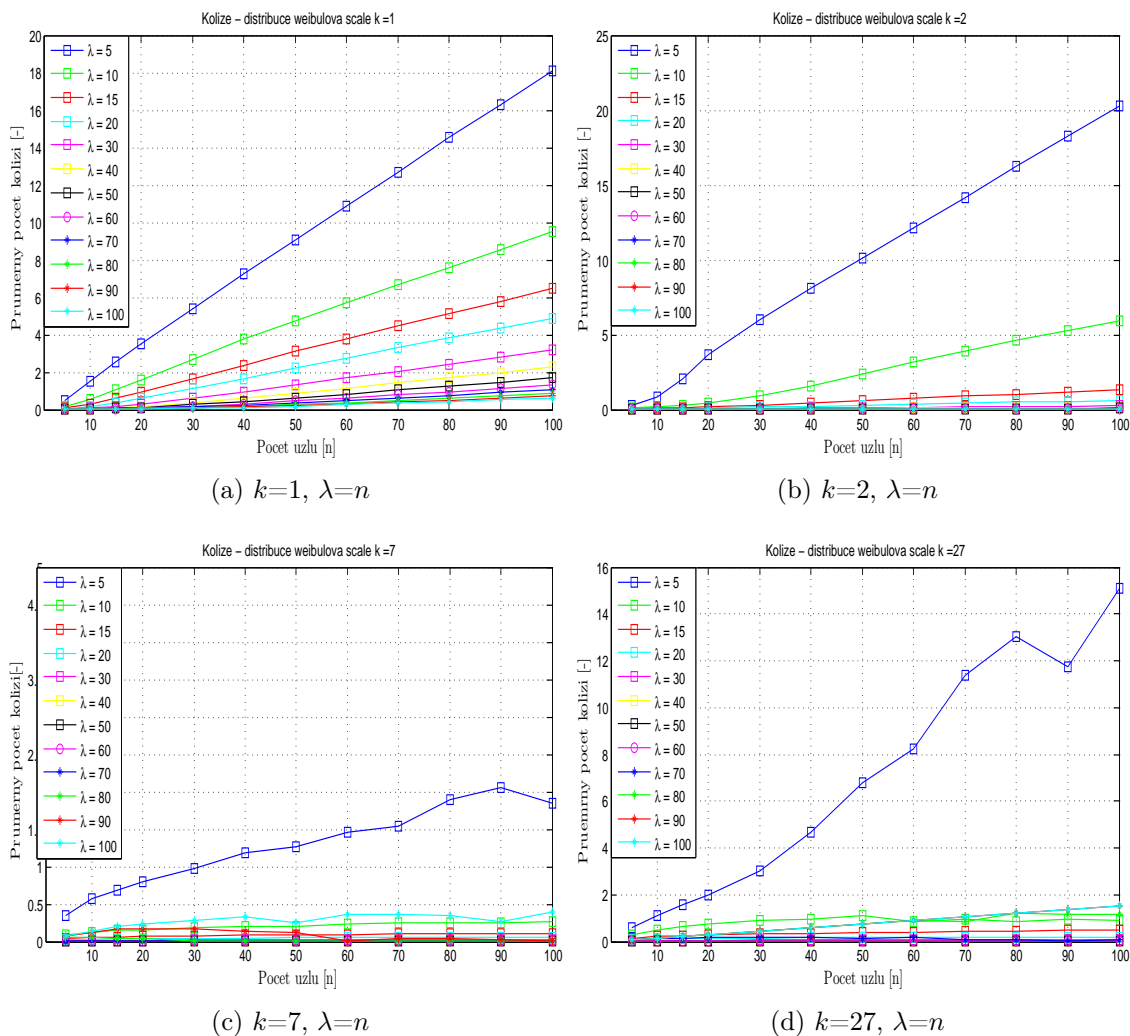
(c) $CW_{max}=192, \lambda=n$



(d) $CW_{max}=256, \lambda=n$

Obr. B.3: Exponenciální distribuce - nezávislost generování okna na zatížení sítě

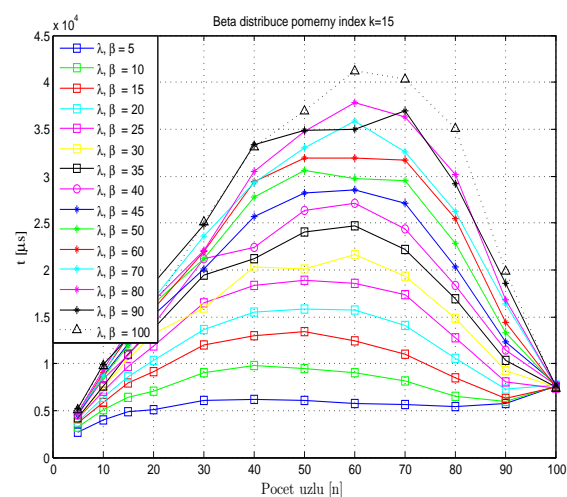
B.2.3 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Weibullovo distribuční rozdělení



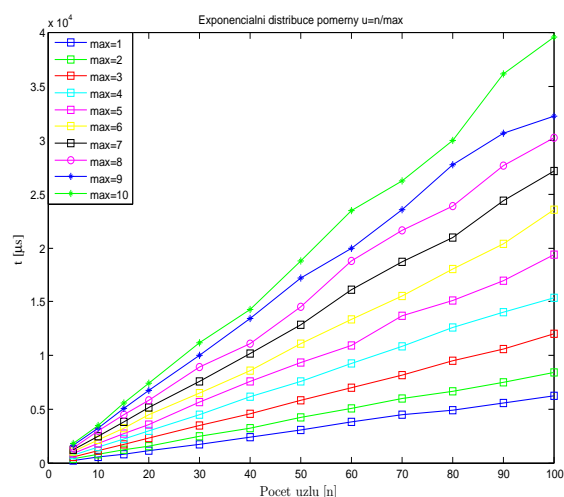
Obr. B.4: Weibullova beta - nezávislost generování okna na zatížení sítě

C ANALÝZA OKNA ALGORITMU HOMEPLUG

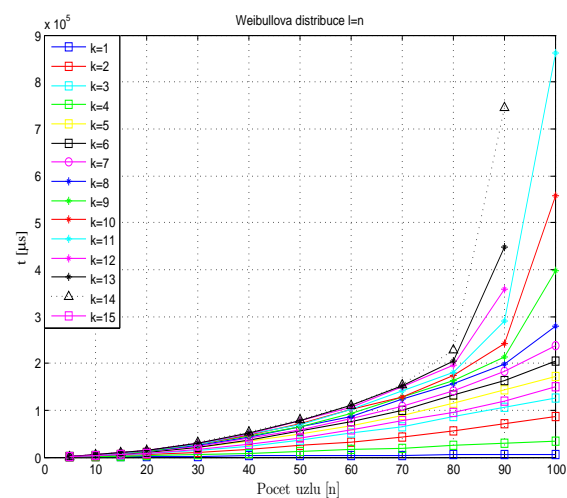
C.1 Analýza okna algoritmu HomePlug - závislost parametrů na zatížení sítě



(a) Distribuce beta



(b) Exponenciální distribuce

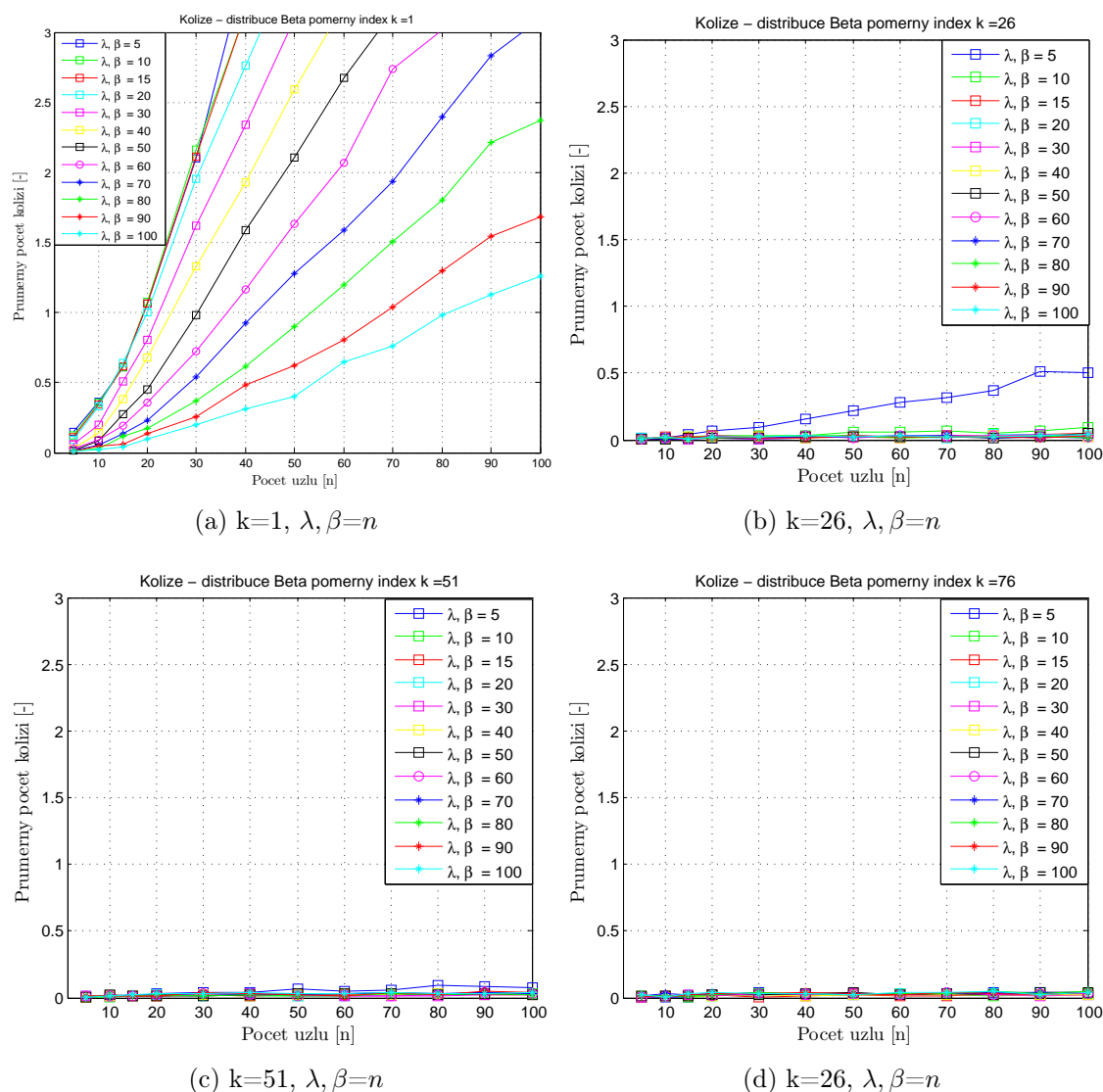


(c) Weibullova distribuce

Obr. C.1: Analýza velikosti okna algoritmu

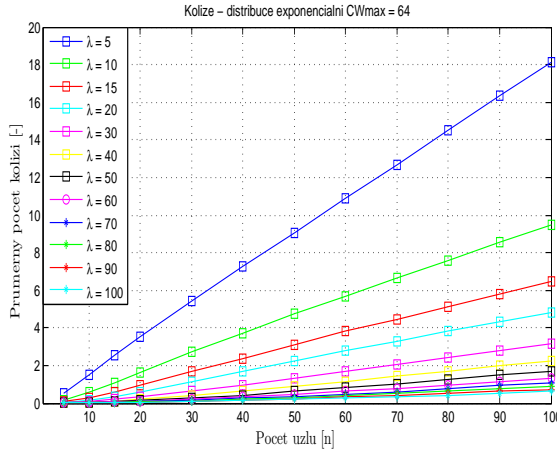
C.2 Analýza velikosti okna algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě

C.2.1 Analýza velikosti okna algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Distribuční rozdělení Beta

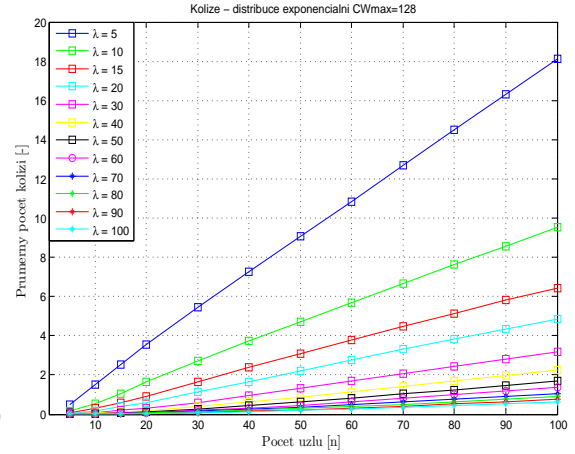


Obr. C.2: Distribuční beta - nezávislost generování okna na zatížení sítě, parametr $k=\{1, 26, 51, 76\}$

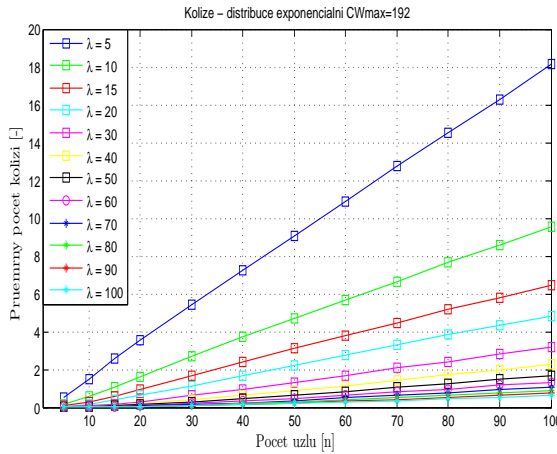
C.2.2 Analýza kolizních stavů algoritmu HomePlug - nezávislost parametrů na zatížení sítě - Exponenciální distribuční rozdělení



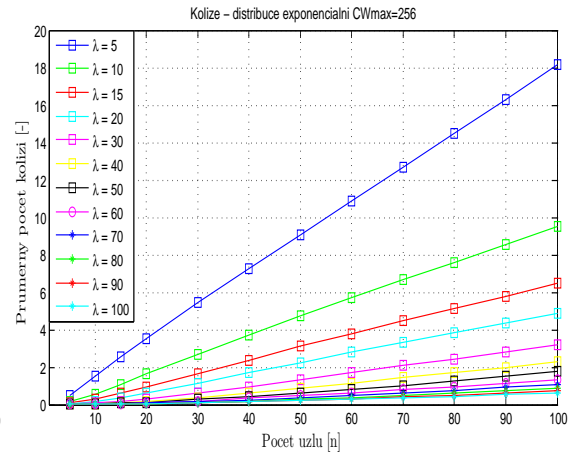
(a) $CW_{max}=64, \lambda=n$



(b) $CW_{max}=128, \lambda=n$



(c) $CW_{max}=192, \lambda=n$



(d) $CW_{max}=256, \lambda=n$

Obr. C.3: Exponenciální distribuce - nezávislost generování okna na zatížení sítě

D ODVOZENÍ PRAVDĚPODOBNOSTNÍCH FUNKCÍ VZNIKAJÍCÍCH *NTIC* V SYSTÉMU

Pro stanovení pravděpodobností bude použita stejná konvence jako v samotné práci. Uzly, které budou mít vygenerovanou hodnotu stejného BC budou označeny NC_i , kde i je počet kolidujících dvojí resp. trojic. Počet uzlů, které budou mít vygenerovanou hodnotu odlišného BC a nebudou v kolizi s žádným jiným budou označeny NS .

D.1 Dva uzly v systému $n=2$

- $NC_1 = 2$ a $NS = 0$:

$$p = \frac{BC_{max}}{BC_{max}^n}, \quad (D.1)$$

- $NC = 0$ a $NS = 2$:

$$p = \frac{\prod_{i=0}^{NS} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}. \quad (D.2)$$

D.2 Tři uzly v systému $n=3$

- $NC_1 = 3$ a $NS = 0$:

$$p = \frac{BC_{max}}{BC_{max}^n}, \quad (D.3)$$

- $NC_1 = 2$ a $NS = 1$:

$$p = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{n=NS} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}, \quad (D.4)$$

- $NC = 0$ a $NS = 3$:

$$p = \frac{\prod_{i=0}^{NS} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}. \quad (D.5)$$

D.3 Čtyři uzly v systému $n=4$

- $NC_1 = 3$ a $NS = 0$:

$$p = \frac{BC_{max}}{BC_{max}^n}, \quad (D.6)$$

- $NC_1 = 4$ a $NS = 1$:

$$p = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{BC_{max} \cdot BC_{max-1}}{BC_{max}^n}, \quad (D.7)$$

- $NC_1 = 2$ a $NS = 2$:

$$p = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{NS} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}, \quad (D.8)$$

- $NC_1 = 2, NC_2 = 2$ a $NS = 0$:

$$p = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{BC_{max} \cdot BC_{max-1}}{BC_{max}^n}, \quad (D.9)$$

- $NC = 0$ a $NS = 4$:

$$p = \frac{\prod_{i=0}^{NS} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}. \quad (D.10)$$

D.4 Pět uzlů v systému $n=5$

- $NC_1 = 5$ a $NS = 0$:

$$p = \frac{BC_{max}}{BC_{max}^n}, \quad (D.11)$$

- $NC_1 = 4$ a $NS = 1$:

$$p = \binom{n}{NS} \cdot \frac{BC_{max} \cdot BC_{max-1}}{BC_{max}^n}, \quad (D.12)$$

- $NC_1 = 3$ a $NS = 2$:

$$p = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{NS} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}, \quad (D.13)$$

- $NC_1 = 3, NC_2 = 2$ a $NS = 0$:

$$p = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{BC_{max} \cdot BC_{max-1}}{BC_{max}^n}, \quad (D.14)$$

- $NC_1 = 2$ a $NS = 3$:

$$p = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{n=NS} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}, \quad (D.15)$$

- $NC_1 = 2, NC_2 = 2$ a $NS = 1$:

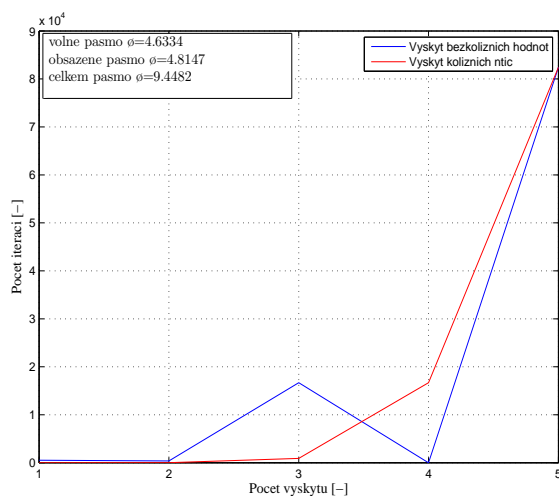
$$p = \frac{1}{2} \binom{n}{NC_2} \binom{n - NC_1}{NC} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{NC_1+NC_2} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}, \quad (D.16)$$

- $NC = 0$ a $NS = 5$:

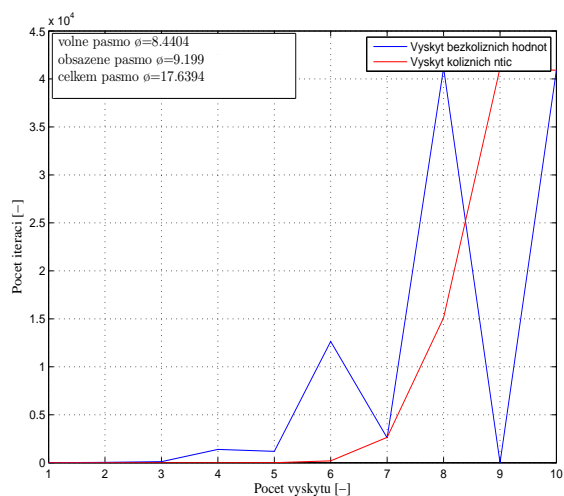
$$p = \frac{\prod_{i=0}^{NS} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}. \quad (\text{D.17})$$

S dalším narůstáním uzlů v systému roste i počet jednotlivých kombinací, které mohou nastat. Proto bylo pro získání těchto údajů přistoupeno k simulační validaci těchto dat.

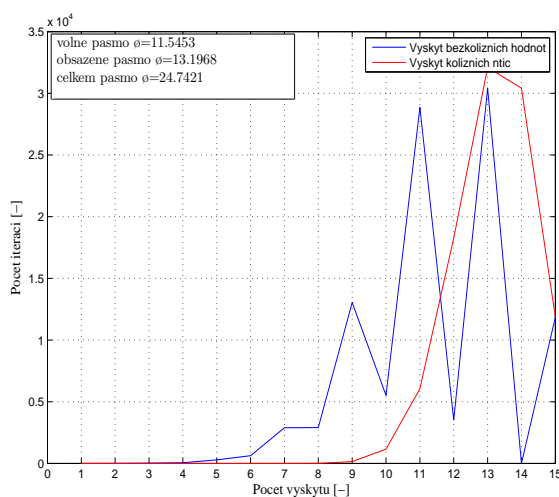
E PRŮBĚŽNÉ VÝSLEDKY VÝSKYTU N -TIC



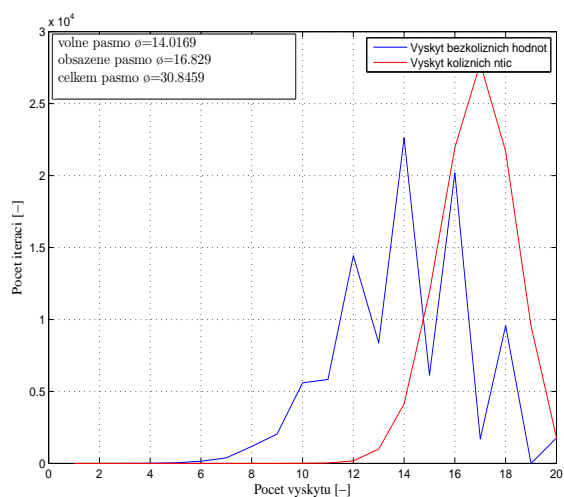
(a) Počet uzlů 5



(b) Počet uzlů 10

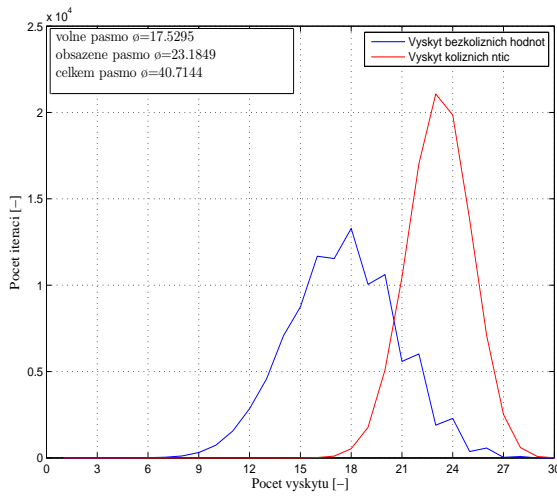


(c) Počet uzlů 15

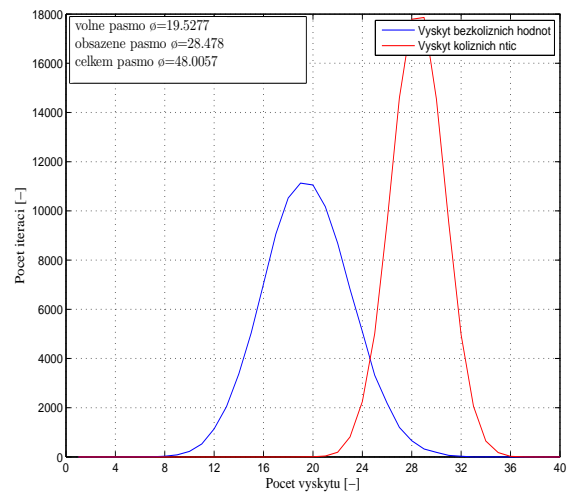


(d) Počet uzlů 20

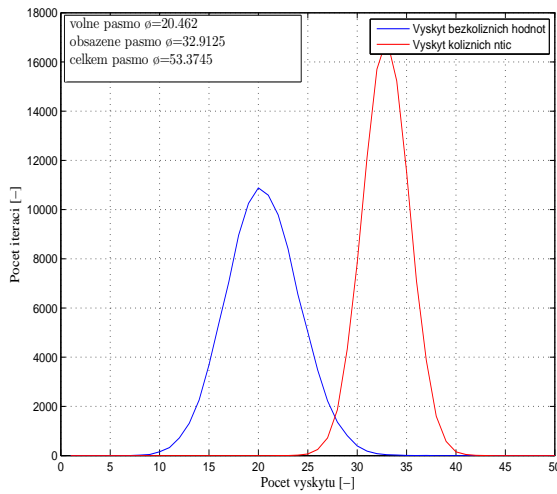
Obr. E.1: Výpočet volného pásma pro jednotlivý počet uzlů v síti



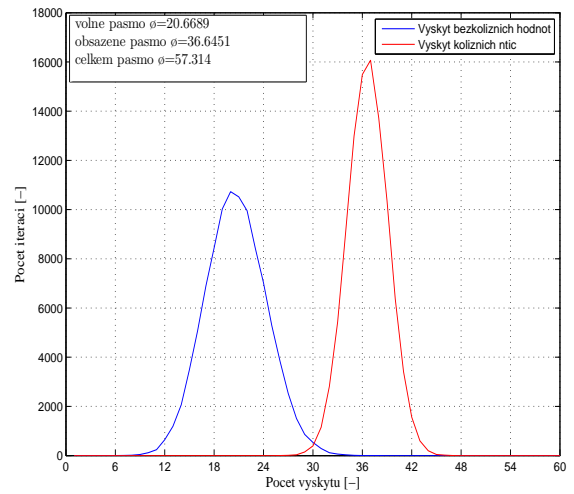
(a) Počet uzlů 30



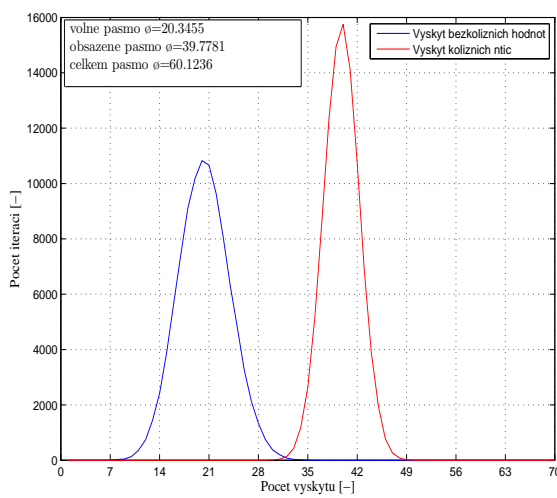
(b) Počet uzlů 40



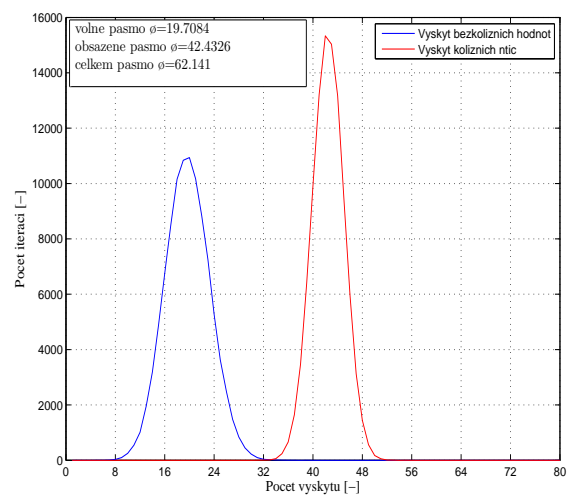
(c) Počet uzlů 50



(d) Počet uzlů 60

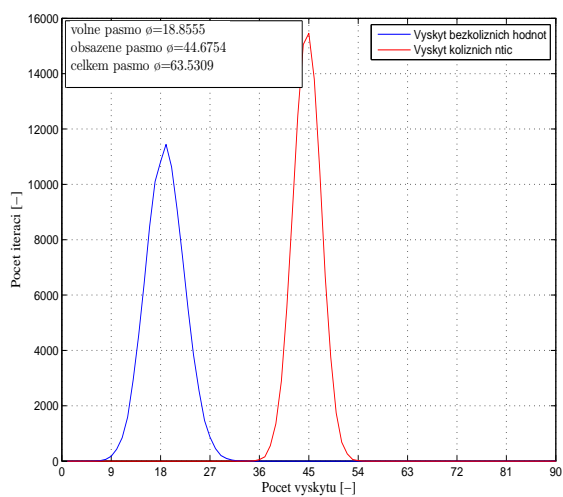


(e) Počet uzlů 70

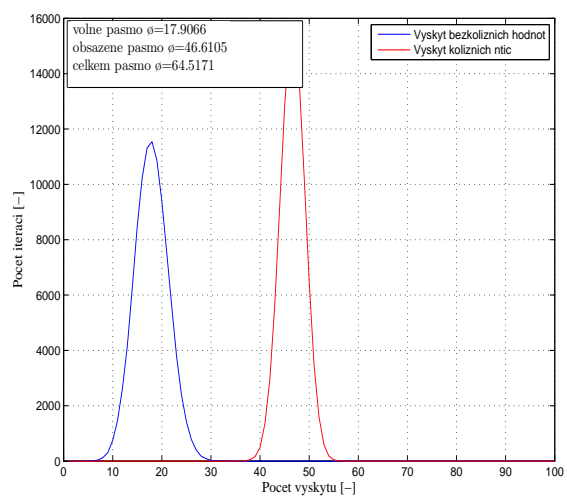


(f) Počet uzlů 80

Obr. E.2: Výpočet volného pásma pro jednotlivý počet uzlů v síti



(a) Počet uzlů 90



(b) Počet uzlů 100

Obr. E.3: Výpočet volného pásma pro jednotlivý počet uzlů v síti

Curriculum Vitae

Martin Koutný

OSOBNÍ INFORMACE *Adresa:* Horky 100c, 664 61 Rebešovice
 Narozen: 24. ledna 1983, Rýmařov
 E-mail: koutnym@feec.vutbr.cz
 Jazykové znalosti: Angličtina

VZDĚLÁNÍ **2007–2011: Vysoké učení technické v Brně**
 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
 • Doktorské studium oboru *Teleinformatika*

2005–2007: Vysoké učení technické v Brně
 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
 • Navazující magisterské studium oboru *Telekomunikační a informační technika*

2002–2005: Vysoké učení technické v Brně
 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
 • Bakalařské studium oboru *Teleinformatika*

1998–2002: Střední průmyslová škola Bruntál
 • Studijní obor: elektronické počítačové systémy

ÚČAST NA PROJEKTECH ***Během studií jsem se podílel na projektech:***

- *TA0103107*: Inteligentní telematický informační systém veřejné dopravy. Řešitel: doc. V. Zeman
- *GA102/09/1846*: Vícetónová modulace realizovaná překryvnou bankou filtrů. Řešitel: Ing. P. Šilhavý
- *FR-TI2/220*: Výzkum modulárního systému pro komunikační technologie a ověření na 2N communication serveru. Řešitel: prof. K. Vrba
- *FT-TA3/011*: Výzkum a vývoj internetové telefonní ústředny. Řešitel: prof. K. Vrba
- *FR-TI1/075*: Aplikovaný výzkum a vývoj systémů dálkového měření kvality dodávky elektrické energie. Řešitel: doc. J. Mišurec
- *FT-TA2/073*: Výzkum a vývoj systému zabezpečené datové komunikace GPRS. Řešitel: prof. K. Vrba
- *1ET110530523*: Aplikovaný výzkum zabezpečené internetové komunikace se vzdálenými koncovými zařízeními v energetice. Řešitel: doc. J. Mišurec
- *MSM21630513*: Elektronické komunikační systémy a technologie nových generací (ELKOM). Řešitelé: prof. Z. Raida, prof. K. Vrba, prof. J. Jan
- *FEKT-S-11-15*: Výzkum elektronických komunikačních systémů. Řešitel: Prof. K. Vrba
- *FEKT-S-10-16*: Výzkum komunikačních systémů a sítí. Řešitel: prof. K. Vrba

- *G1/2753*: Zavedení silné autentizace uživatele do laboratorních cvičení předmětu Kryptografie v informatice. Řešitel: Ing. P. Lambertová
- *F1a/2383*: Inovace laboratorních úloh v kurzech zaměřených na datovou komunikaci. Řešitel: Ing. M. Koutný

ČLENSTVÍ V
PROFESNÍCH
SDRUŽENÍCH

- členství v Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)
- členství v The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)
- členství v The Institution of Engineering and Technology (IET)

VYŽÁDANÉ
RECENZE

Vyžádané recenze pro vědecké časopisy a konference:

- 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (2)
- 6th International Conference on Teleinformatics (3)
- Elektrorevue - Internetový časopis (3)
- Student Electrical Engineering, Information and Communication Technologies (3)

VÝSLEDKY
V ČÍSLECH

Počet recenzí: 10

h-index podle Web of Science: 2

h-index podle Scopus: 1

Celkový počet publikací včetně pedagogických: 43

- *Počet publikovaných nebo přijatých článků v impaktovaných časopisech: 2*
- *Počet prezentovaných nebo přijatých příspěvků na konferencích: 23*
- *Ostatní odborné časopisy a konference: 18*

Poslední aktualizace: 27. července 2011